

Simulação de placas de circuitos impressos por elementos finitos com NX Nastran

César Manuel Ribeiro Castro

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. João Manuel R. S. Tavares (FEUP/DEMec)

Orientador na empresa: Bruno Carvalho



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro 2015

Ao meu pai.

Resumo

Nos dias que correm, os computadores assumem um grande papel no quotidiano, nas nossas casas, no nosso trabalho e até nos nossos bolsos. Teria sido impossível para o Homem ir à Lua sem a ajuda destes equipamentos, e seria impossível hoje, uma empresa ser capaz de operar sem recorrer aos mesmos.

Com a evolução da computação, evoluíram todas as áreas da ciência. A possibilidade de realizar cálculos complexos em microssegundos revolucionou a forma de explorar áreas antes desconhecidas, permitindo fazer mais e melhor num menor espaço de tempo.

A simulação numérica foi uma das áreas impulsionadas pela evolução da computação. Se nos anos 50 e 60 apenas as grandes empresas tinham disponibilidade financeira para recorrer a este tipo de previsão. Hoje qualquer pessoa na posse do *software* apropriado pode utilizar o método dos elementos finitos (MEF).

A presente dissertação, realizada em parceria com a Bosch Car Multimedia Portugal S.A., teve como objetivo aproximar a simulação pelo MEF, do departamento de avaliação de amostras, adicionando assim uma ferramenta ao *portfolio* da equipa, o que significa um *know-how* acrescentado à equipa o qual fornece flexibilidade na resolução de problemas estruturais, em particular na simulação de placas de circuitos impressos (*printed circuit board*, vulgarmente conhecida como PCB).

Durante este trabalho, foi procurado atingir resultados através do MEF comparáveis aos resultados de deformação no PCB ao ser solicitado pelos processos da linha de montagem, obtidos pela equipa de validação de processos. Contudo, foi necessário simplificar o problema efetuando aproximações, de forma a permitir a realização das simulações, num espaço de tempo compatível com as necessidades, e mais tarde avaliando a sua possível interferência nos resultados.

Na busca de informações acerca do processo de validação, foi notório que o mesmo não estava completamente definido. A partir deste facto, foi elaborada uma proposta de melhoria, com o objetivo de definir os parâmetros do teste de validação, de forma a eliminar a incerteza à volta do mesmo.

Para a equipa foi também importante aproveitar as potencialidades do *software* NX 7.5 para outras finalidades, assim foram também realizados estudos de interferência entre peças. A possibilidade de realizar este estudo com recurso a *software*, permite que o mesmo seja executado numa pequena porção do tempo por vezes necessário para realizar a mesma tarefa manualmente.

Estas atividades representam os principais objetivos do estágio realizado, e foram concluídas com sucesso, no entanto à data de conclusão desta dissertação, permanece por formalizar a proposta de melhoria, a qual deve ser investigada com maior profundidade.

No campo das simulações os valores alcançados em termos de aproximação à realidade e de tempo de realização das mesmas, a equipa considerou os resultados satisfatórios em enquadramento com o necessário para as atividades da equipa. O mesmo se verificou com em relação aos estudos de interferência.

Em suma, o estágio revelou-se frutífero para a empresa, ficando a equipa com o *know-how* necessário para utilizar o *software* para fins de simulação, tornando mais rápida a concretização das atividades que podem ser realizadas por este meio.

Simulation of printed circuit boards by finite elements with NX Nastran

Abstract

Nowadays, computers play a big role on our quotidian, our homes, our jobs even our pockets. It would have been impossible for the Man to go up to the Moon without the help of these equipments, and today it would be impossible for a company to be able to operate without these.

Along with the evolution of computation, all areas of science evolved. The possibility to perform complex calculations in microseconds revolutionized the way to explore areas that were unknown, giving the possibility to make more and better in a shorter space of time.

Numerical simulation was one of the areas being catapulted by computing evolution. In the 50's and 60's only big companies had the financial availability to make use of this type of prevision. In our days, anyone that has access to a suitable software can use the finite element method (FEM).

This thesis, elaborated in collaboration with Bosch Car Multimedia Portugal, S.A., had as an objective bringing the finite element method closer to the mechanical samples assessment team, adding another tool to their portfolio, meaning that the team now has a bigger know-how which provides the team with more flexibility solving structural problems, particularly on the simulation of printed circuit boards (PCB's).

During the elaboration of the present thesis, it was tried to achieve by FEM comparable results for the deformation of a PCB being forced by the assembly line processes, with the results from the process validation team. However, it was necessary to simplify the problem doing approximation, in order to allow the simulation to be performed in a time frame reasonable according the necessities of the team, later evaluating the possible interference in the results.

Along with the research of information about the validation process, it was clear that the process was not completely defined. Due to this, was elaborated an improvement proposal with the objective of defining the validation test parameters, in order to eliminate the uncertainty around it.

For the team it was also important to take advantage of the capabilities of the NX 7.5 software for other purposes, due to this interference studies were also made using the software. The possibility to make these studies using the software, allows the study to be performed much more quickly compared with the manual process.

These activities represented the main targets for the internship, and were successfully concluded, however at the date of conclusion of this thesis, the improvement proposal was still to be formalized, and it must also be subjected to a deeper analysis.

On the simulation field the achieved results considering both the approximation to the reality and the time needed, were evaluated by the team as satisfactory in line with what is necessary for the activities of the team. The same feedback was given in relation to the interference studies.

Summarizing, the internship proved to be a fruitful for the company, as the team received the know-how necessary to use the software for simulation purposes, enabling the team to be faster at finishing activities that can be made by the software.

Agradecimentos

O realizar desta dissertação contribuiu de sobremaneira para a minha formação, quer a nível académico, quer a nível profissional, mas também a nível pessoal. Foi um percurso longo, mas não foi feito sozinho, e por isso gostaria de agradecer:

Ao meu orientador e *team leader*, Bruno Carvalho, e aos meus colegas Nuno Neiva, Nuno Rebelo, Rui Veloso, Vasco Mendes, Luís Freitas e Daniel Gomes, pelo apoio prestado, pelo acolhimento na equipa, profissional e pessoalmente, pelo que me ensinaram ao longo do estágio e por me terem proporcionado um ambiente de trabalho de companheirismo e boa disposição.

Ao meu orientador na faculdade o Prof. Doutor João Tavares, pelo suporte prestado e disponibilidade para orientar o caminho a seguir para a realização do trabalho.

Ao meu pai, o exemplo que eu procuro replicar todos os dias, pelos princípios e ideais que sempre me transmitiu e que na sua ausência se traduzem numa presença constante.

À minha mãe, que sempre foi um pilar e que mesmo ficando sozinha lutou, dia após dia, para que eu pudesse chegar aqui, garantindo sempre o conforto necessário em todas as ocasiões, acompanhando as fases mais difíceis e pela educação que me proporcionou.

Aos meus irmãos, que apesar da distância, por vezes grande, sempre estiveram perto nas alturas cruciais, com toda a disponibilidade necessária para acompanhar os momentos importantes da minha vida.

À minha namorada, Silvana, companheira de vida, a quem devo muito daquilo em que me tornei. Pelo amor, pelo carinho, pela paciência, pelo abrigo, por me apoiar em todas as decisões, por nunca deixar de estar presente e pela genuína sinceridade, que me fez crescer em todos os níveis.

À Bebianana, à Elvira e à Sara, amigas de longa data, que sempre se mantiveram lealmente presentes, e que nos momentos bons e maus, sempre foram confidentes e sinceras, mesmo quando a verdade não é agradável de ouvir.

Aos amigos que conheci durante a vida académica Carlos Sousa, Daniel Sá, Diogo Gonçalves, João Sá, Manuel Gaspar, Manuel Santos, Rafael Gonçalves, Ricardo Rocha e Tânia Rodrigues, pelo companheirismo e divertimento, pelas longas horas de estudo, diurnas e noturnas que me trouxeram até aqui.

Um obrigado geral a todos os citados e àqueles que mesmo sendo não citados fazem parte da minha vida.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Robert Bosch GmbH	3
1.2	Bosch Car Multimédia Portugal, S.A.	3
1.3	Enquadramento do projeto	5
1.4	Estrutura da Dissertação	5
2	Método dos Elementos Finitos	7
2.1	Introdução	9
2.2	Fundamentos	9
2.3	Requisitos para uma análise estrutural	10
2.4	Etapas para resolução de um problema	10
2.5	Elemento Tetraédrico	12
2.6	Introdução ao <i>software</i> NX 7.5	12
2.7	Sumário	13
3	Simulações Realizadas	15
3.1	Enquadramento	17
3.2	PCB e especificações	19
3.3	Considerações	19
3.4	Procedimento	20
3.5	Condições e Parâmetros	21
3.6	Malha e dimensões da placa	24
3.7	Avaliação de cenários de simulação	24
3.8	Método de recolha de resultados	25
3.9	Sumário	27
4	Análise de resultados	29
4.1	Teste prático	31
4.2	Simulação I	32
4.3	Simulação II	34
4.4	Simulação III	36
4.5	Simulação IV	38
4.6	Simulação V	39
4.7	Conclusões	42
5	Estudo de colisões	45
5.1	Enquadramento	47
5.2	Procedimento	47
6	Propostas de melhoria	51
6.1	Problemática	53
6.2	Objetivo	53
6.3	Análise de estudo demográfico	53
6.4	Análise de avaliação ergonómica	56
6.5	Avaliação da força de fecho de um conetor	57
6.6	Sumário	59
7	Conclusão e trabalho futuro	61
	Referências	67
	Anexo: Outras atividades desenvolvidas	1
	JIG Audi	3
	JIG para testes de tração de adesivos (BMW)	3
	Participação em <i>workshops</i> DFMA	4
	Testes de pull-out-force (PSA)	5

Siglas

CAM – *Computer assisted manufacturing*

MEF – Método dos elementos finitos

PCB – *Printed circuit board*

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Logótipo do Grupo.....	3
Figura 1.2 – Instalações da Bosch Car Multimedia Portugal, S.A.	3
Figura 1.3 – BMW HUD.	4
Figura 1.4 – Audi TT.	4
Figura 1.5 – BMW I12.	5
Figura 2.1 – Elemento CTETRA4.....	12
Figura 2.2 – Elemento CTETRA10.....	12
Figura 3.1 – Vista explodida, Audi TT.....	17
Figura 3.2 – Conexão de <i>flex foil</i>	18
Figura 3.3 – <i>Design frame</i> , com <i>dials</i> e <i>foils</i> colocadas.	18
Figura 3.4 – Desenho 3D do PCB sem componentes.....	20
Figura 3.5 – Aplicação da solicitação na placa.	21
Figura 3.6 – Pontos de fixação do <i>suporting plate</i>	22
Figura 3.7 – Pontos de ligação por união.	23
Figura 3.8 – Contactos entre <i>suporting plate</i> e PCB.	23
Figura 3.9 – Ilustração da malha	24
Figura 3.10 – Aplicação da carga em área semelhante a um dedo.....	25
Figura 3.11 – Pormenor da geometria das células.....	25
Figura 3.12 – Localização dos sensores no lado frontal da placa.....	26
Figura 3.13 – Localização dos sensores no lado traseiro da placa.	26
Figura 3.14 – Nós seleccionados para obtenção de resultados.	27
Figura 4.2 – Deformação da face frontal na direção x , simulação I.	32
Figura 4.3 – Deformação da face frontal na direção y , simulação I.	33
Figura 4.4 – Deformação da face traseira segundo x , simulação I.	33
Figura 4.5 – Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação I.....	33
Figura 4.6 – Deformação da face frontal na direção x , simulação II.....	34
Figura 4.7 – Deformação da face frontal na direção y , simulação II.....	35
Figura 4.8 – Deformação da face traseira da placa segundo x , simulação II.....	35
Figura 4.9-- Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação II.....	35
Figura 4.10 – Deformação da face frontal na direção x , simulação III.	36
Figura 4.11 – Deformação da face frontal na direção y , simulação III.	36
Figura 4.12 – Deformação da face traseira da placa segundo x , simulação III.	37
Figura 4.13 – Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação III.	37
Figura 4.14 – Deformação da face frontal na direção x , simulação IV.	38
Figura 4.15 – Deformação da face frontal na direção y , simulação IV.	38

Figura 4.16 – Deformação da face traseira da placa segundo x , simulação IV	39
Figura 4.17 – Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação IV	39
Figura 4.18 – Deformação da face frontal na direção x , simulação V.	40
Figura 4.19 – Deformação da face frontal na direção y , simulação V.	40
Figura 4.20 – Deformação da face traseira da placa segundo x , simulação V.	41
Figura 4.21 – Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação V.	41
Figura 5.1 – Peças para análise de interferências.	47
Figura 5.2 – PCB após a análise de interferência, a vermelho as zonas onde a mesma existe.	48
Figura 5.3 – <i>Supporting plate</i> após análise, a vermelho assinaladas as zonas de interferência.	49
Figura 6.1 – Aplicação de força em <i>poke</i>	54
Figura 6.2 – Aplicação de força tipo <i>press</i>	54
Figura 6.3 – Aplicação de força em <i>pull</i>	54
Figura 6.4 – Aplicação de força por <i>lateral pinch</i>	55
Figura 6.5 – Aplicação de força por <i>chuck pinch</i>	55
Figura 6.6 – Aplicação de força por <i>palmar pinch</i>	55
Figura 6.7 – Movimento ideal de fecho do conetor.....	57
Figura 6.8 – Posicionamento da ponta de prova do dinamómetro, para fecho do conetor.	57
Figura 6.9 – Ilustração de uma <i>foil</i> mal posicionada no conetor.	58
Figura A.1 – <i>JIG</i> para montagem de PCB no <i>supporting plate</i>	3
Figura A.2 – <i>JIG</i> para teste de <i>pull out force</i>	4
Figura A.3 – Teste de <i>pull ou force: plate</i>	5
Figura A.4 – Teste de <i>pull out force: heat sink</i>	5

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Características dos materiais.....	21
Tabela 4.1 – Resultados do teste prático.	32
Tabela 4.2 – Parâmetros de teste, simulação I.....	32
Tabela 4.3 – Resultados da simulação I.	34
Tabela 4.4 – Resultados da simulação II.	36
Tabela 4.5 – Resultados da simulação III.....	37
Tabela 4.6 – Parâmetros de teste, simulação IV.....	38
Tabela 4.7 – Resultados da simulação IV.....	39
Tabela 4.8 – Parâmetros de teste, simulação V.	40
Tabela 4.9 – Resultados da simulação V.....	41
Tabela 4.10 – Compilação de resultados das simulações.....	42
Tabela 6.1 – Resultados de testes de força.	56
Tabela 6.2 – Resultados do teste de fecho dos conectores.....	58

1 Introdução

Este capítulo pretende apresentar o tema desenvolvido nesta dissertação e descrever a organização deste relatório. O trabalho foi desenvolvido ao longo de 6 meses, nas instalações e em colaboração com a empresa Bosch Car Multimedia Portugal, S.A..

Nos subcapítulos seguintes, é apresentado o grupo Robert Bosch GmbH, a empresa Bosch Car Multimedia Portugal, S.A., o projeto que foi desenvolvido ao longo do estágio e também a estrutura adotada para na dissertação.

1.1 Robert Bosch GmbH



Figura 1.1 – Logótipo do Grupo.

A história do Grupo Bosch (Figura 1.1) iniciou-se no dia 15 de novembro de 1886, dia em que Robert Bosch recebeu a aprovação oficial para abrir a “oficina de mecânica de precisão e eletricidade” em Estugarda, Alemanha (URL 1).

Hoje a Bosch é uma empresa global com cerca de 440 subsidiárias, em aproximadamente 60 países, chegando os seus produtos a mais de 150. Liderada por Volkmar Denner (CEO), a Bosch conta com cerca de 360.000 (01/01/2015) funcionários e com um volume de vendas na ordem dos 49 mil milhões de Euros. As principais áreas de negócio são as soluções de mobilidade, bens de consumo, energia e tecnologia de construção e soluções industriais (URL 2).

O slogan, “*Invented for life*”, define a vocação da empresa para a inovação tecnológica, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida proporcionando soluções que são inovadoras e benéficas.

1.2 Bosch Car Multimédia Portugal, S.A.



Figura 1.2 – Instalações da Bosch Car Multimedia Portugal, S.A.

Situada em Braga, a Bosch Car Multimedia Portugal, S.A., é a principal fábrica da divisão Car Multimedia da Bosch e a maior empresa do grupo situada em Portugal. Tendo iniciado a sua atividade em 1990, a empresa é um dos maiores empregadores da região Minho, com cerca de 2380 colaboradores (URL 3).

Na unidade de Braga (Figura 1.2) são fabricados diversos produtos eletrónicos, tais como, autorrádios, sistemas de navegação, sistemas de comunicação de emergência, *clusters*, entre outros produtos destinados à indústria automóvel, e equipamentos para produtos de outras empresas do grupo.

Entre os principais produtos destacam-se:

- BMW Head Up Display



Figura 1.3 – BMW HUD.

A Figura 1.3 mostra o *head up display*, presente em diversos carros do grupo BMW, sistema utilizado para projetar informação num ecrã transparente colocado ao nível do olhar do condutor, esta tecnologia é a mesma utilizada em aviões de combate, que possibilita a leitura de informação sem desviar o olhar.

- Audi TT FPK



Figura 1.4 – Audi TT.

A Figura 1.4 mostra o *cluster* totalmente programável aplicado no mais recente Audi TT.

- BMW FPK



Figura 1.5 – BMW i12.

Na Figura 1.5 o *cluster* utilizado no superdesportivo híbrido BMW i8.

Segundo o Instituto Nacional de Estatística, a fábrica bracarense da Bosch Car Multimédia foi a 6ª maior exportadora nacional em 2010.

1.3 Enquadramento do projeto

O estágio foi realizado com plena integração no departamento CM/MFI2-COSM, cujas funções são efetuar o *assessment* (avaliação) mecânico das amostras de produto com vista à sua industrialização.

O projeto foi baseado na introdução de *software* 3D (NX 7.5), como ferramenta de trabalho no departamento. Com a introdução desta nova ferramenta, foi possível tornar mais ágil o processo de avaliação das amostras, tornando com o *software* a análise de problemas mais eficaz e permitindo sobretudo o estudo de soluções de forma mais rápida, menos dispendiosa e com possibilidade de efetuar simulações computacionais que permitam averiguar a viabilidade de soluções, sem danificar ou modificar de forma permanente peças protótipo, o que significa diminuir os gastos relacionados com o consumo de peças para testes.

De uma forma mais concreta, neste trabalho pretendeu-se avaliar a possibilidade de executar testes de deformação de placas de circuito, os quais são necessários para validar o processo de montagem na linha de produção.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em mais seis capítulos e um anexo:

- Capítulo 2: Método dos elementos finitos. Este capítulo é uma breve introdução ao método dos elementos finitos, percorrendo a sua história, fundamentos, requisitos e etapas. Neste capítulo é também introduzido o *software* utilizado na elaboração do projeto.

- Capítulo 3: Simulações. Neste capítulo é abordado o tema principal da dissertação, apresentando o contexto em que é realizado o trabalho, os objetivos e considerações pertinentes no trabalho.
- Capítulo 4: Análise de resultados. É feita a exposição dos resultados obtidos nas diferentes simulações.
- Capítulo 5: Estudo de colisões. Abordagem à análise de colisões e interferências entre peças mecânicas, com recurso ao *software* utilizado.
- Capítulo 6: Proposta de melhoria. Desenvolvimento de uma proposta de melhoria com o objetivo de especificar o teste a partir do qual foi desenvolvido o trabalho.
- Capítulo 7: Conclusão e trabalho futuro. Sumário das conclusões retiradas do trabalho realizado, e previsão do trabalho futuro a ser realizado no âmbito da dissertação.
- Em anexo: descrição de outras atividades realizadas durante o estágio.

2 Método dos Elementos Finitos

Ao longo deste capítulo é realizada uma introdução ao método dos elementos finitos (MEF), revendo os seus fundamentos, requisitos e etapas necessárias para efetuar uma análise, é feita referência aos tipos de elementos utilizados pelo *software* NX 7.5, e elaborada uma introdução ao próprio *software*. Por fim é efetuada uma conclusão sumária sobre o capítulo.

2.1 Introdução

Quando hoje em dia se fala em simulação numérica, o método dos elementos finitos é, em geral, o primeiro a ser considerado. Este método tem vindo a mostrar-se particularmente versátil na análise de problemas de vários tipos, com elevada eficácia.

As origens deste método remontam aos processos de análise estrutural utilizados nos séculos XVIII e XIX, é no entanto no artigo realizado por *Courant* em 1943 que estão as raízes do método de elementos finitos, no qual foram utilizadas equações polinomiais aplicadas a sub-regiões triangulares num problema de torção.

A utilização do método começou a ser explorada mais profundamente por M. J. Turner, entre os anos 50 e 60, na Boeing. Durante este período outras pessoas começaram a utilizar este tipo de cálculo, e praticamente todos o que o fizeram, estavam ou haviam estado ligados à indústria aeronáutica. Esta ligação comum não se deveu ao acaso, mas sim ao facto do grau de complexidade dos cálculos exigir o recurso à computação digital, que nesta época apenas estava ao dispor das grandes empresas que dispunham de elevados recursos financeiros para satisfazer essa necessidade (URL 4).

O método tornou-se popular à medida que começou a ser utilizado a nível académico. Tendo os conhecimentos sido fornecidos por Turner, a professores académicos que estavam ligados à Boeing. Entre os artigos mais relevantes encontra-se o de Argyris escrito em 1954 sobre teoremas energéticos e métodos matriciais. Em 1967 era lançado por Zienkiewicz e Chung o primeiro livro sobre método de elementos finitos (Chandrupatla and Belegundu 1997).

Com o desenvolvimento das tecnologias de computação, o desempenho dos computadores aumentou, ao passo que o seu custo se tornou mais acessível. Deste modo, a utilização do MEF tornou-se acessível para a análise de estruturas com várias solicitações (Gaspar 2010).

A popularidade está relacionada com a elevada versatilidade do método. É possível com elementos finitos fazer vários tipos de análise, a estrutural (Ayhan and Schafer 2015), a dinâmica (Egan et al. 2015), a térmica (Exizidis et al. 2015), a de vibração (Liyanapathirana and Ekanayake 2016), e a eletromagnética (Abdi et al. 2015), são as situações mais recorrentes. Deste modo, é um método de simulação comum para muitas áreas da engenharia. (URL 5).

2.2 Fundamentos

O MEF consiste na divisão de um elemento contínuo em elementos mais pequenos de geometria conhecida. Estes últimos são conhecidos como elementos finitos, uma vez que, apesar menores do que o elemento contínuo, têm um tamanho finito conhecido.

Cada um dos elementos finitos possui as mesmas propriedades do meio contínuo em estudo, e está ligado aos elementos na sua vizinhança através de nós, também conhecidos como pontos nodais. Este processo, denominado por discretização, resulta num conjunto de equações algébricas (URL 6).

Um meio contínuo pode ter um número infinito de graus de liberdade, enquanto no MEF o número de graus de liberdade é finito.

É necessário considerar que os resultados obtidos pelo método de elementos finitos são apenas aproximados e não resultados exatos. No entanto, a aproximação pode ser otimizada diminuindo o tamanho dos elementos ou aumentando o número de graus de liberdade. Desta forma, atingir resultados com melhor aproximação, requer utilizar um maior número de equações e consequentemente mais capacidade de processamento (URL 6).

Entre as vantagens do MEF, destacam-se a capacidade de lidar com geometrias irregulares e complexas de forma fácil, a capacidade de ajustar de forma simples o espaçamento entre nós para assimilar a geometria de forma correta e a facilidade com que é possível trabalhar com materiais não homogêneos (Stasa 1985). Em termos de desvantagens, a necessidade de utilizar um computador e *software* dispendioso (Stasa 1985) é a característica, pela negativa, mais relevante.

Com os computadores da atualidade, podemos obter resultados com boa aproximação para peças com um grau de complexidade considerável. Contudo, com o avanço da computação avançaram também os métodos de análise e o rigor necessários, pelo que em algumas áreas continua a ser necessário fazer elevados investimentos para ter capacidade computacional para resolver problemas com complexidade maior, e de rigor elevado.

2.3 Requisitos para uma análise estrutural

1. Geometria a analisar;
2. Elementos ligados por nós;
3. Propriedades mecânicas do material;
4. Condições de fronteira e restrições do meio contínuo;
5. Carregamentos e solicitações.

2.4 Etapas para resolução de um problema

1. Discretização e escolha do tipo de elemento:

Transformar o sistema contínuo num sistema equivalente, constituído por elementos finitos, sem espaços vazios ou sobreposição (Liu and Quek 2013, O. C. Zienkiewicz 1994). Deve considerar-se o elemento a utilizar e a sua dimensão, em função da precisão dos resultados desejada e da capacidade de computação disponível (Logan 2002).

2. Seleção das funções de deslocamento:

Escolher a função de deslocamento em cada elemento, utilizando os valores nodais de cada um (Logan 2002).

3. Definir a relação de tensão/deslocamento:

No caso analisado, para simular um objeto 3D, é necessário ter em conta deformação nas três direções, x , y e z , o que se traduz nas equações:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{du}{dz} \quad (2.3)$$

A equação que define a lei de tensão/deformação:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (2.4)$$

$$\sigma_y = E\varepsilon_y \quad (2.5)$$

$$\sigma_z = E\varepsilon_z \quad (2.6)$$

Onde:

E , representa o módulo de elasticidade
 ε , representa a deformação, e
 σ , a tensão.

É nesta fase em que as características dos materiais em estudo são introduzidas no problema (Logan 2002).

4. Obtenção da matriz de rigidez dos elementos:

Antigamente seria necessário ter um elevado conhecimento em análise estrutural, para obter a matriz de rigidez através dos coeficientes de influência. Hoje, podem ser utilizados outros métodos, como, o método do equilíbrio direto, métodos energéticos ou métodos de resíduos ponderados. Qualquer um dos métodos produz equações que descrevem o comportamento dos elementos (Logan 2002).

O conjunto de equações determinado é normalmente escrito sob a forma de matriz:

$$\begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{1z} \\ \vdots \\ F_{nx} \\ F_{ny} \\ F_{nz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \\ \vdots \\ d_{nx} \\ d_{ny} \\ d_{nz} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

De forma mais simplificada:

$$\{F\} = [K] \cdot \{d\} \quad (8)$$

Onde os vetores F e d definem, respetivamente, as forças globais do sistema, F_{ij} , e os deslocamentos implicados no sistema, d_{ij} . Assim às forças aplicadas nos nós i , com direção j , correspondem deslocamentos em cada nó e direção (Logan 2002).

Esta relação é determinada pela matriz de rigidez K , constituída pelos coeficientes de rigidez, neste caso para o elemento genérico.

Para problemas estruturais, a resolução desta equação serve de base para o cálculo, a dimensão dos vetores e da matriz, depende do tipo de elemento a utilizar, e dos graus de liberdade existentes.

5. Construção das equações dos elementos e introdução de condições de fronteira:

Sobrepoem-se as equações dos elementos, para criar a equação global do sistema, e são introduzidas as condições de fronteira, as quais, criam restrições ou modificações nas forças aplicadas (Logan 2002).

6. Resolução em ordem aos graus de liberdade desconhecidos:

Determinação dos valores das incógnitas, através de métodos iterativos ou de eliminação (Gauss-Seidel ou Gauss, respetivamente).

7. Cálculo das tensões e deslocamentos:

Obtenção dos valores de tensão e deslocamento, particularmente importantes na análise estrutural, através dos valores obtidos no passo anterior.

8. Interpretação de resultados.

2.5 Elemento Tetraédrico

O código NX Nastran utilizado através do modo de simulação de *design*, permite utilizar apenas dois tipos de elementos, designados *CTETRA4* e *CTETRA10*, ambos tetraédricos (URL 7). Cada uma das opções é baseada no elemento tetraédrico, o mais simples entre os elementos tridimensionais.

O elemento mais simples dos dois é o *CTETRA4* (Figura 2.1), correspondendo a um polígono tridimensional, em que cada um dos seus vértices representa um nó. Este tipo de elemento permite a criação de uma malha linear (URL 8).

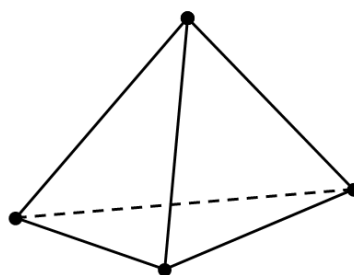


Figura 2.1 – Elemento CTETRA4.

No caso do *CTETRA10* (Figura 2.2), por sua vez, cada elemento tem uma dezena de nós, somando-se aos nós presentes nos vértices, nós que estão nas arestas do polígono, à mesma distância de ambos os vértices. Com este tipo de elemento podem ser criadas malhas parabólicas (URL 8).

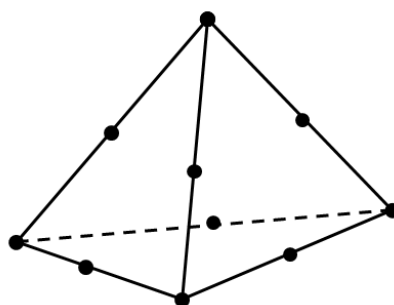


Figura 2.2 – Elemento CTETRA10.

A diferença, porém, estende-se além do número de nós, a presença de nós intermédios, traduz-se numa linearização do comportamento do material, dentro do mesmo elemento, que leva a resultados de precisão superior.

2.6 Introdução ao software NX 7.5

O *software* escolhido para ser implementada a sua utilização no departamento, foi o NX 7.5 da SIEMENS. A escolha deriva das capacidades do *software* a nível de modelação e de simulação por elementos finitos.

A história deste programa teve início em 1969, quando a empresa de *software* *United Computing*, lançou o UNIAPT o primeiro programa de *computed assisted manufacturing*

(CAM). No ano de 1973 a empresa comprou o código do programa ADAM (*Automated drafting and machining*) à MCS, código esse que se veio a tornar no programa UNI-GRAPHICS que viria a ser lançado 2 anos mais tarde. Mais tarde e depois da *United Computing* ter sido adquirida pela *McDonnell Douglas Aircraft* o programa continuou em desenvolvimento. Anos mais tarde em 2007 era lançado o primeiro programa com o nome NX, o NX5. Atualmente já está disponível o NX10 (URL 9). Este *software* encontra-se no sector de mercado para utilizadores avançados, o que se reflete também num custo mais elevado (Kolan).

No que se refere às potencialidades deste *software*, estas são imensas. Não só permite modelar e simular objetos, permite também de forma simples projetar moldes para injeção de plástico bem como produzir programas de CAM.

No que à simulação diz respeito, o programa pode executar desde simulações simples através do ambiente de simulação de *design* ou simulações de elevada complexidade no modo de simulação avançada. Este último, não foi utilizado para as simulações que adiante serão descritas, uma vez que se trata de uma licença *stand-alone* de elevado valor, que além de ser dispendiosa não se adequa às simulações pretendidas, as quais podem obter-se sem este módulo, uma vez que o modo de simulação de *design* já permite a utilização do MEF para simulações estruturais estáticas, de vibrações e ainda estudos térmicos.

A linguagem usada pelo programa deriva do código NASTRAN (*NASA Structural Analysis*), cujo desenvolvimento se iniciou nos anos 60, no seio da agência espacial norte-americana, com o objetivo de permitir análise de elementos finitos na investigação de projetos para exploração espacial. É um código com grande polivalência uma vez que é capaz de fazer análises de elevada complexidade nos domínios estáticos e dinâmicos (URL 10).

2.7 Sumário

Foi realizada neste capítulo uma breve introdução ao MEF, a sua aplicação nesta dissertação é meramente uma gota no mar de possibilidades que este método proporciona.

A importância do MEF nos dias de hoje é crucial em diversas áreas de negócio, uma vez que permite sem recursos ou perdas, executar previsões fiáveis do comportamento dos variados tipos de sistemas.

Neste capítulo ficamos a conhecer a origem do MEF, os fundamentos em que este se baseia, as etapas necessárias para realizar este tipo de simulação, os tipos de elementos que foram utilizados nesta dissertação e por fim uma introdução ao *software* utilizado.

3 Simulações Realizadas

Ao longo deste capítulo, é descrito o trabalho de análise elaborado com o objetivo de efetuar as simulações pelo MEF. Este capítulo é iniciado com uma contextualização da aplicação do MEF no âmbito do departamento, e nas atividades realizadas pela equipa, seguindo-se uma análise às especificações existentes sobre as placas de circuitos. São também descritas as considerações necessárias para a realização das simulações, os procedimentos, condições e parâmetros de simulação, e avaliados os cenários de simulação que podem ser considerados.

3.1 Enquadramento

O propósito da utilização de *software* de simulação prendeu-se sobretudo com a necessidade de estudar soluções e permitir uma avaliação preliminar da sua eficiência.

A integridade dos componentes eletrónicos é primordial na manutenção dos padrões de qualidade da empresa. Um componente danificado pode causar problemas ou impedir por completo o funcionamento do produto.

O estudo que se pretendeu realizar serve para aferir as deformações exercidas nas placas de circuitos impressos (*printed circuit boards*, PCB's) durante a montagem das unidades. Este processo é de importância vital, sendo um requisito para a aprovação dos dispositivos de montagem.

Foram utilizados numa primeira fase os dados provenientes do processo de aprovação do produto AUDI TT, uma vez que, este produto reprovou na primeira avaliação, tendo sido necessário realizar um retrabalho físico nas peças de suporte do PCB.

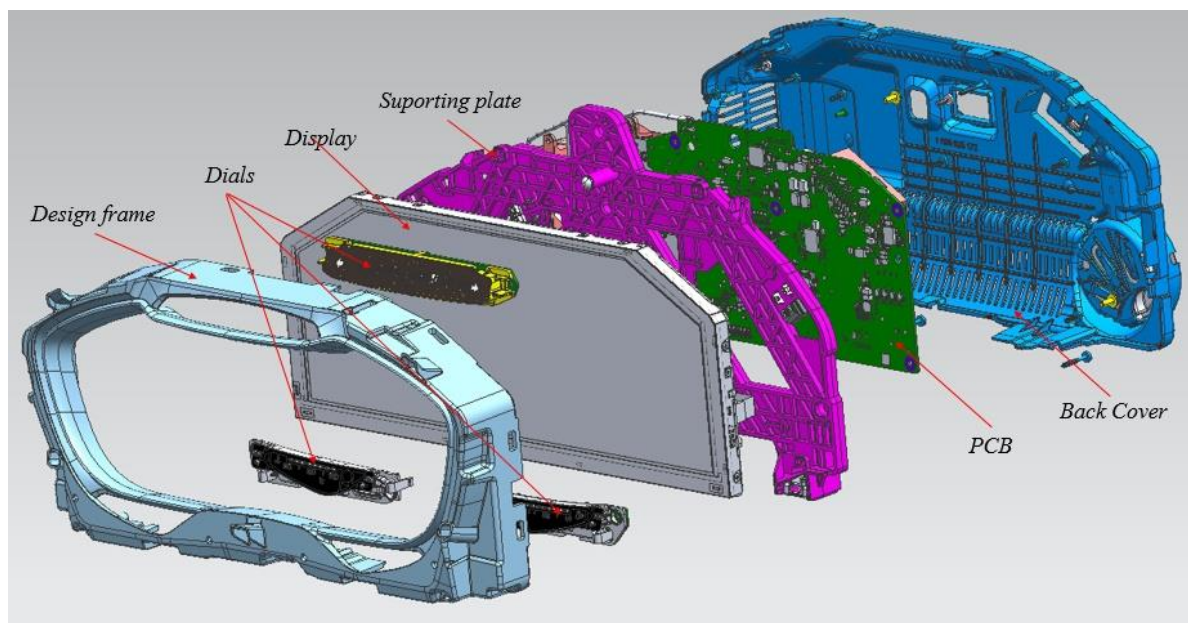


Figura 3.1 – Vista explodida, Audi TT.

O estudo foi contudo dificultado pela existência de uma solicitação padrão a ser aplicada nos conectores aquando do teste de validação, assim, foi decidido utilizar testes onde o objetivo foi obter a força necessária para provocar as deformações de referência, demonstradas adiante.

Na Figura 3.1 é possível observar uma vista explodida do produto a qual serve para identificar os elementos que constituem a mesma.

Neste caso, o objeto de estudo é uma placa de circuitos, que é submetida a esforços aquando da conexão de *flex foils*, nos respetivos conectores.

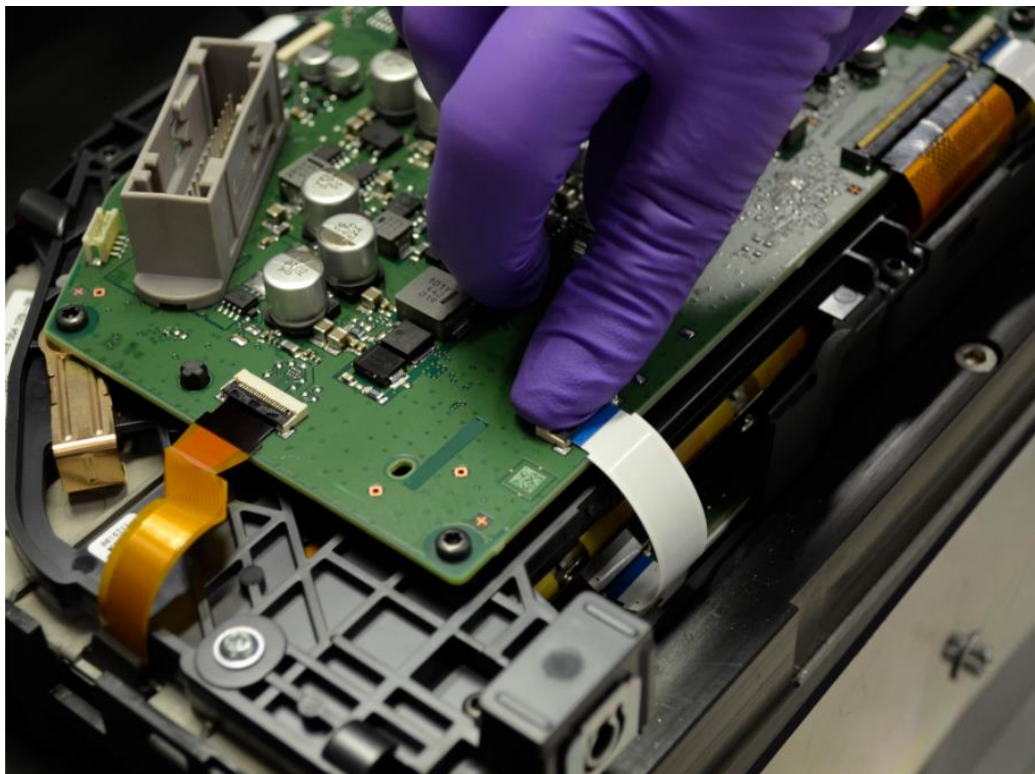


Figura 3.2 – Conexão de *flex foil*.

Esta operação é realizada durante o processo de montagem final do equipamento.

A realização da operação é realizada pelos operadores de linha, que realizam a mesma conforme é visível na Figura 3.2.

Neste caso concreto, a colocação da *flex foil* que serve de objeto de estudo, é realizada no posto em que, o conjunto *display*, *supporting plate*, PCB, é colocado no *design frame*, com as respectivas *dials*, já montadas, como demonstra a Figura 3.3.



Figura 3.3 – *Design frame*, com *dials* e *foils* colocadas.

Cada uma das referidas *dials* utiliza uma *flex foil*, que permite a sua ligação ao PCB principal.

Para proceder à simulação, é necessário simplificar o sistema a estudar, uma vez que a simulação de todos os elementos, elevaria em grande escala a complexidade da simulação, e, consequentemente, seria necessário mais tempo para a realização das simulações.

Avaliada a influência de cada peça na deformação da placa em estudo, foi determinado que a simulação deveria ser feita juntamente com o *supporting plate*, uma vez que este contém pinos que suportam o PCB.

Definidas as peças a analisar, de seguida foi efetuada a análise às condições de simulação, solicitações e condições de fronteira.

3.2 PCB e especificações

Os PCB's vulgarmente designados *chips*, são na prática placas de circuitos elétricos impressos. Estas são a base de praticamente todos os equipamentos eletrónicos do dia-a-dia, desde telemóveis e computadores, até eletrodomésticos de todos os tipos.

Com a evolução deste tipo de produtos, que caminha no sentido de mais funcionalidades em dispositivos com menores dimensões e menor peso, é necessário que os PCB's integrem uma maior quantidade de circuitos e componentes. (Li et al. 2008)

Desta forma, surgiram os PCB's com múltiplas camadas de circuitos, suportando componentes e circuitos mais complexos. Estas placas de circuitos são geralmente constituídas por múltiplas camadas de resina *epoxy* reforçada com tecido de fibra de vidro entre folhas de cobre. (Li et al. 2008)

Para possibilitar o funcionamento dos circuitos, são inseridos no PCB os diversos componentes eletrónicos, sendo os mesmos soldados na placa por um processo soldadura por refluxo, onde a solda é colocada no PCB, os componentes são posicionados nos seus locais e de seguida a placa passa por fornos onde a soldadura é concluída.

Por este motivo, a flexão da placa é um risco para a integridade da mesma, uma vez que existe a possibilidade de ao provocar a sua flexão, partir componentes frágeis ou a solda entre os componentes e a placa. A primeira solução para análise do comportamento de laminados com diferentes materiais foi dada por Timoshenko (1925), baseado na teoria das vigas, e a análise por elementos finitos foi dada por J. H. Lau (1989). (Li et al. 2008)

As especificações internas da empresa determinam que o valor máximo admissível para a deformação dos PCB's é de 800 $\mu\text{m/m}$, sendo que a partir dos 500 $\mu\text{m/m}$, já é necessário tomar medidas de prevenção, para baixar os valores máximos atingidos no teste.

Valores acima de 800 $\mu\text{m/m}$ podem ser problemáticos para diversos componentes. Os componentes críticos são: componentes cerâmicos ou vítreos (baixa resistência à tração), como por exemplo resistências, e BGA's (Ball Grid Arrays), componentes como processadores, que possuem bolas de solda ao invés de pinos, e cuja solda pode ser danificada por deformações na placa.

3.3 Considerações

Antes de iniciar as simulações foi importante ter em atenção os seguintes aspetos:

- No desenho 3D não estavam contemplados todos os componentes inseridos na placa.
- Não estava contemplada a ligação entre os componentes e a placa (*soldering*).
- A placa não estava desenhada com os orifícios de inserção de componentes, apenas os orifícios de maiores dimensões estavam presentes, furos de guiamento de componentes de maiores dimensões e furos de aparafusamento.
- As camadas interiores da placa juntamente com as pistas de cobre também não estavam presentes no ficheiro 3D.

Estes pontos têm influência direta no comportamento mecânico da placa, porém, a total definição de parâmetros, tem como consequência um aumento da dificuldade de simulação, que deriva da elevada complexidade inerente. Por exemplo, definir o PCB como uma placa de laminado, com diferentes camadas de tecido de fibra de vidro, implica discretizar o tecido de fibra constituído por filamento. Logicamente a pequena dimensão e elevada quantidade de filamentos existentes na placa, implicariam um acréscimo acentuado de tempo apenas para executar a discretização.

De forma a tornar viável a execução das simulações no âmbito do departamento, foi imperativamente necessário simplificar e reduzir a complexidade da placa, retirando os seus componentes e considerando a placa como um elemento sólido e homogêneo, como é demonstrado na Figura 3.4.

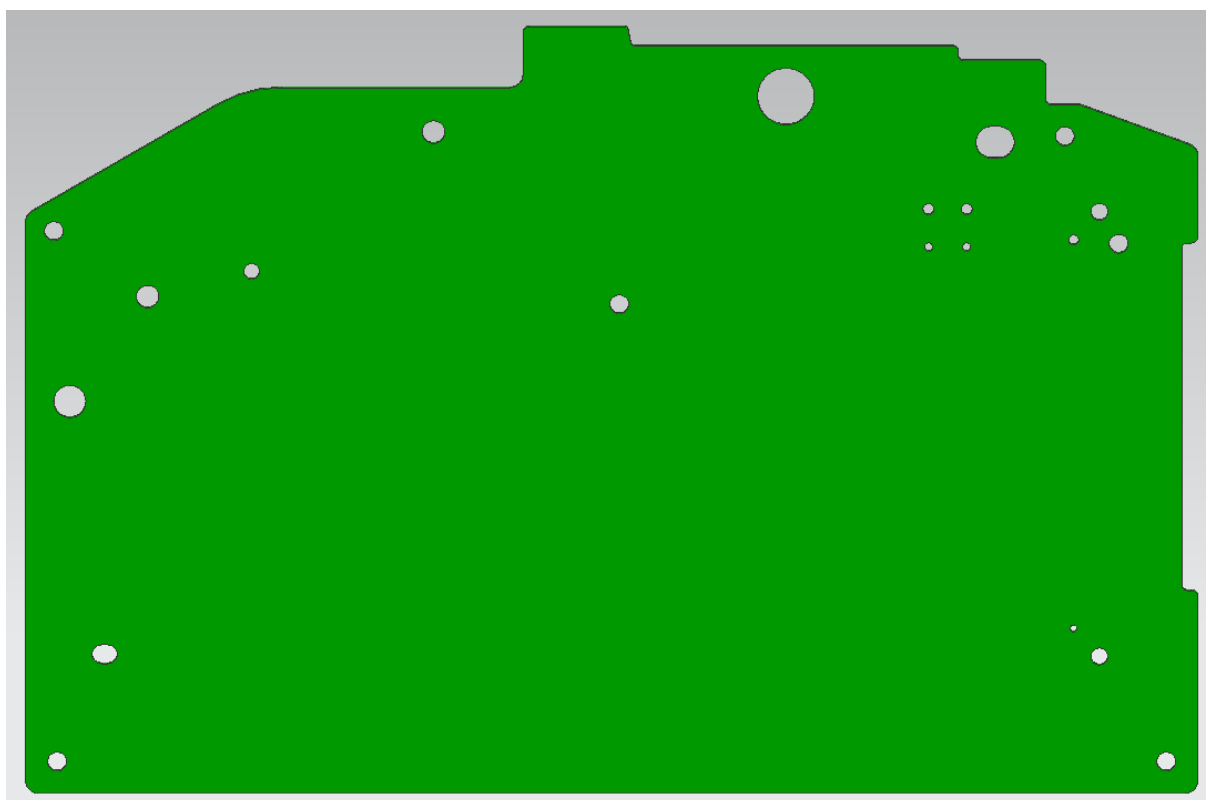


Figura 3.4 – Desenho 3D do PCB sem componentes.

3.4 Procedimento

O procedimento planeado para a realização das simulações, foi partir dos testes realizados para os quais existia um valor de força aplicada, e procurar atingir nas áreas onde os extensómetros recolheram resultados, valores idênticos, os quais fossem satisfatórios para as análises a realizar no âmbito da avaliação de amostras.

Realizar simulações com diferentes parâmetros de forma a perceber quais os parâmetros a utilizar nos testes futuros, e qual a influência dos parâmetros no tempo necessário para simulação e na precisão dos resultados obtidos.

3.5 Condições e Parâmetros

1. Materiais

As propriedades dos materiais presentes são determinantes para traduzir o comportamento mecânico das peças em estudo.

Para realizar estas simulações foi necessário fazer uma pesquisa dos materiais de modo a obter as suas propriedades mecânicas, de forma a aumentar a precisão das simulações.

Na Tabela 3.1 é possível observar para cada peça, o material que a constitui bem como as suas propriedades mecânicas.

Tabela 3.1 – Características dos materiais.

	<i>Supporting plate</i>	PCB	Conectores
Designação	Ryton ® BR111 BL	S1000B FR4	PP
Material	PPS – GF40	FR4	Polipropileno
Módulo de Elasticidade (E)	20 GPa	22 GPa	2 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.34	0.135	0.4
Tensão de cedência	800 MPa	320 MPa	31 MPa

2. Solicitação

A solicitação aplicada na placa aquando da montagem, ocorre no fecho dos conectores, onde é aplicada força perpendicular à placa no sentido descendente. No caso em estudo, o teste é executado com recurso ao uso de um dinamómetro.

A placa é colocada, juntamente com os extensómetros colocados previamente, no *supporting plate*, ao qual é aparafusada. O dinamómetro é posicionado para pressionar a placa, em cada conector, com objetivo de determinar a força necessária para que se atinja 500 $\mu\text{m/m}$ em algum dos pontos de medição

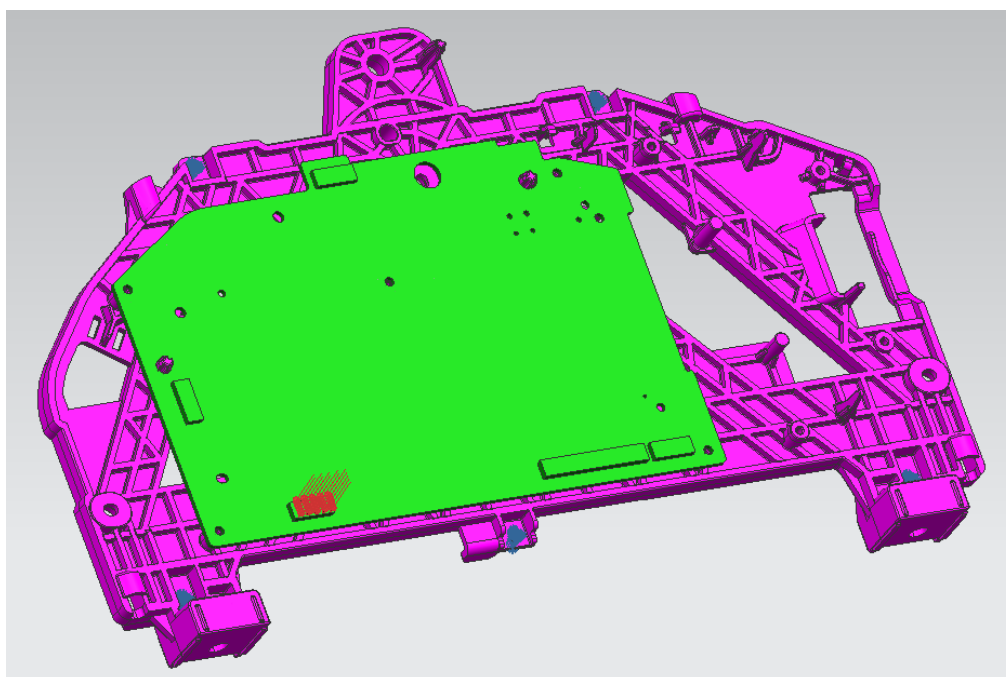


Figura 3.5 – Aplicação da solicitação na placa.

Desta forma, a solicitação aplicada para efetuar a simulação, corresponde à força obtida no teste prático realizado pela equipa de validação. Para o conetor onde a carga está assinalada na Figura 3.5, foi necessária uma força de 78.3 N para se atingir 500 $\mu\text{m/m}$ em um dos sensores.

3. Restrições

As restrições nas peças são dependentes do método de fixação entre elas, neste caso, as ligações entre as peças são todas aparafusadas, quer entre o *suporting plate*, e o PCB, quer entre o *suporting plate*, e o *design frame*. No entanto, em termos da simulação estas serão abordadas de forma diferente, devido às diferentes influências dos restantes elementos.

No caso do *design frame*, este é colocado num *jig*, que garante um suporte da peça equilibrado em toda a superfície. Posto isto, e tendo em conta que para as solicitações aplicadas a deformação da peça à compressão será aproximadamente nula, a condição de restrição aplicada no aparafusamento do *suporting plate*, é de encastramento, uma vez que o aparafusamento, juntamente com o suporte do *design frame*, garantem que a peça permanece imóvel em todos os graus de liberdade parametrizáveis no *software* (x , y , z , M_x , M_y , M_z). Pode verificar-se a localização dos pontos na Figura 3.6, onde os mesmos estão assinalados a preto.

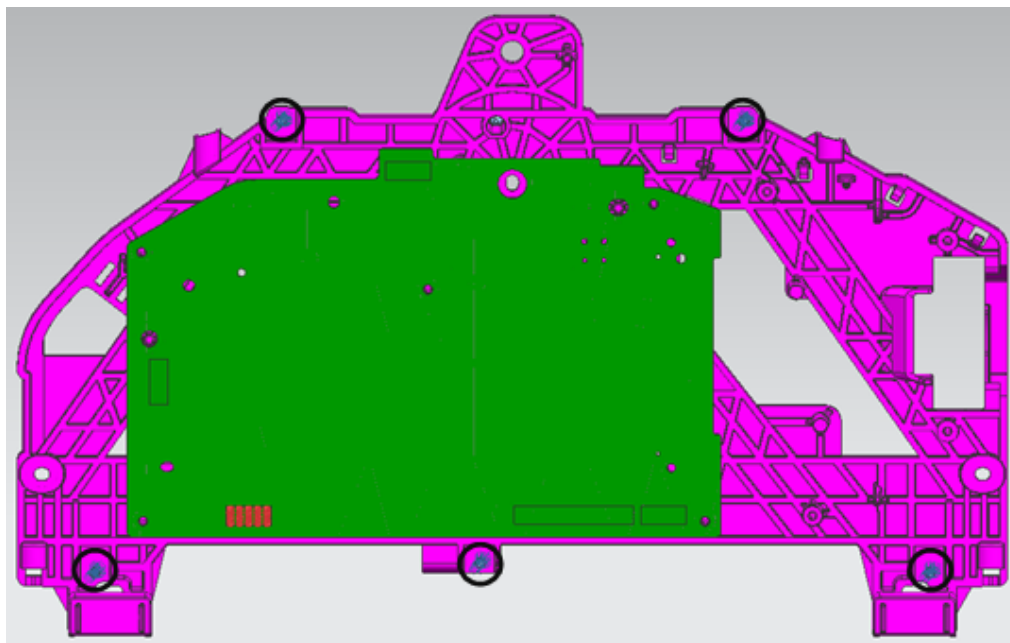


Figura 3.6 – Pontos de fixação do *suporting plate*.

No caso do PCB, a sua flexibilidade e fragilidade, exige a presença de pontos de apoio no *suporting plate*, nos quais existe contacto entre ambos, pelo que as restrições de contacto entre as peças necessitam de ser consideradas. Quanto ao aparafusamento, e porque o *suporting plate* é também sujeito a flexão provocada pela solicitação, a restrição do aparafusamento não é de encastramento, mas sim de união das superfícies, aproximação sugerida por um colega do departamento de simulação, como sendo preferível para simular um aparafusamento.

Na Figura 3.7 é possível distinguir onde se encontram as restrições de união.

Além destas restrições é ainda necessário considerar os contactos entre o PCB e o *suporting plate*, uma vez que estes têm como função limitar a flexão do PCB quando este é solicitado, transferindo o esforço para o *suporting plate*. Os pontos de contacto estão visíveis na Figura 3.8.

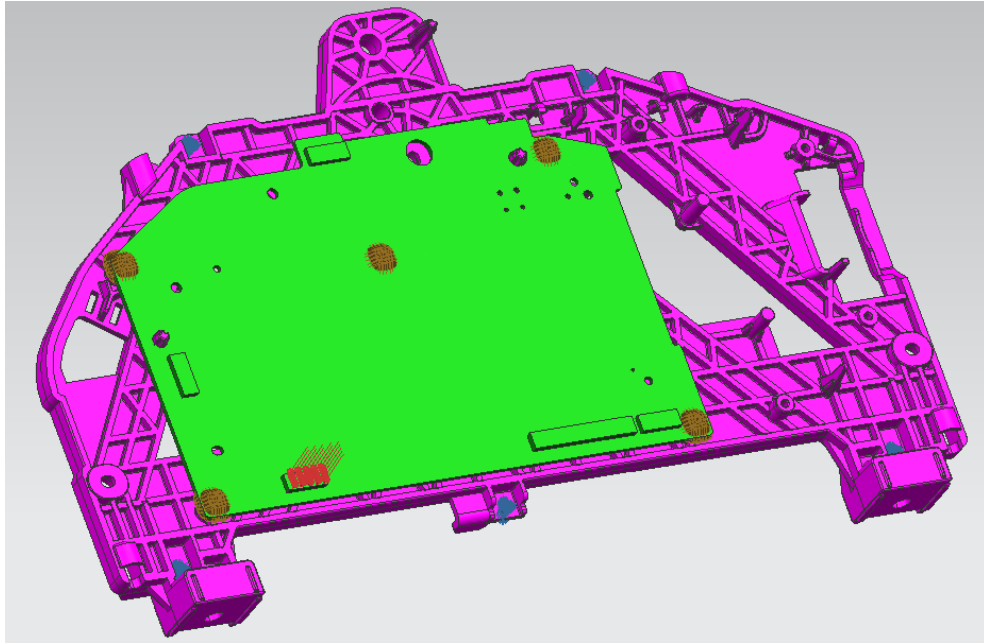


Figura 3.7 – Pontos de ligação por união.

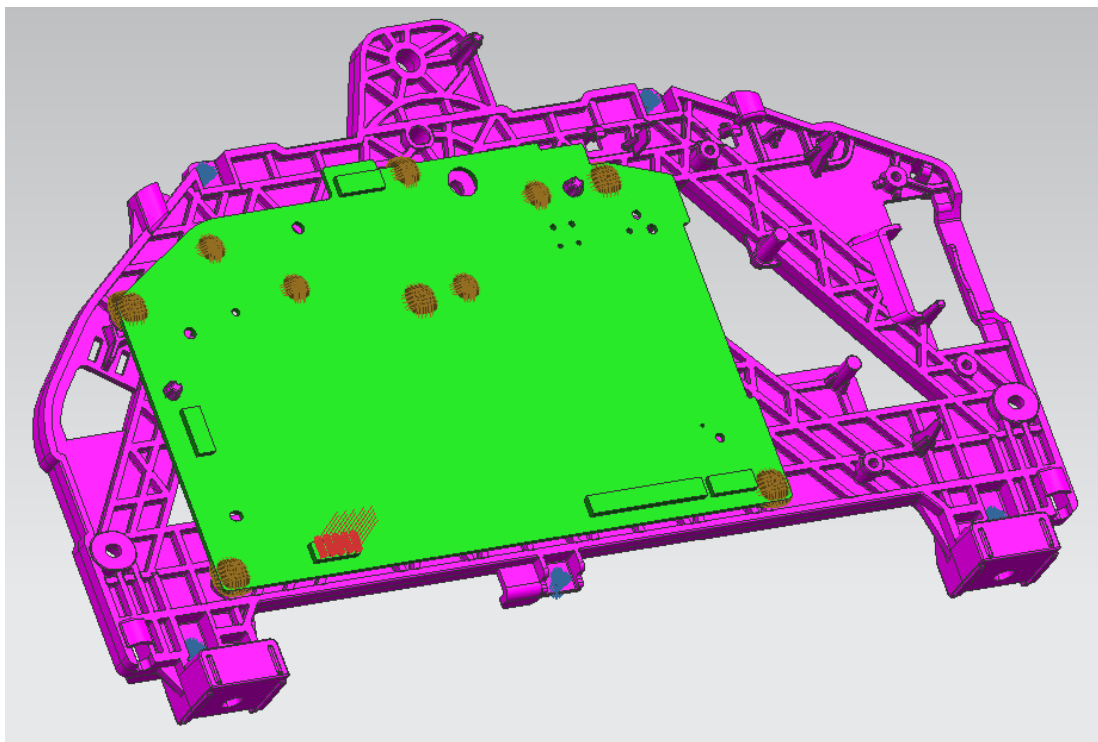


Figura 3.8 – Contactos entre *supporting plate* e PCB.

4. Elementos finitos

A definição dos elementos a utilizar na discretização da peça, tem implicação direta no resultado obtido e no tempo de simulação.

Para a realização dos testes preliminares, foram utilizados elementos de 1 mm em ambas as peças. De forma a realizar as simulações num espaço de tempo razoável, numa fase em que foi necessário afinar vários parâmetros de forma também a perceber, que parâmetros do *software* podem influenciar a simulação, e de que forma isso pode acontecer.

3.6 Malha e dimensões da placa

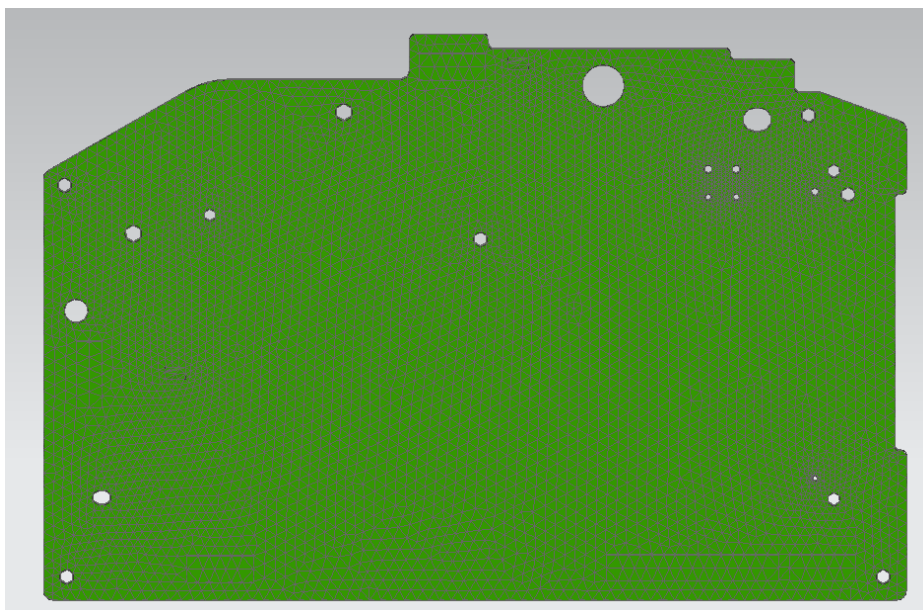


Figura 3.9 – Ilustração da malha.

Na Figura 3.9, pode observar-se a malha gerada, neste caso com uma dimensão característica dos elementos de 2mm, permitindo que se observe a dispersão dos elementos na placa.

Em termos gerais as dimensões desta placa são, considerando as faces mais distantes em cada direção; 185 mm de largura, por 120mm de altura, com uma espessura de 1.6 mm (apenas placa de circuitos).

3.7 Avaliação de cenários de simulação

Numa fase inicial, foi necessário estudar várias hipóteses para perceber quais as melhores condições para obter resultados coerentes com a realidade. Estes testes diferem em pequenos parâmetros ajustados no software, que criam uma maior ou menor aproximação à realidade, com o objetivo de perceber qual a melhor forma de preparar a simulação, e comparar os resultados com vista a entender os que produzem um melhor compromisso.

Em todas as situações, os conetores originais no desenho, foram substituídos por blocos de igual dimensão e do mesmo material do PCB.

1º. Cenário

Neste teste foram utilizadas as peças sem mais alterações. Com as condições descritas anteriormente.

2º. Cenário

Este segundo teste, difere do anterior na área de aplicação da força. Como se pode observar na Figura 3.10 O conector contém um pequeno contorno, com uma dimensão que pretende simular um dedo a pressionar a peça, apesar de esta medida não ter como base uma dimensão estudada, pretende simular o efeito de uma maior concentração da força aplicada.

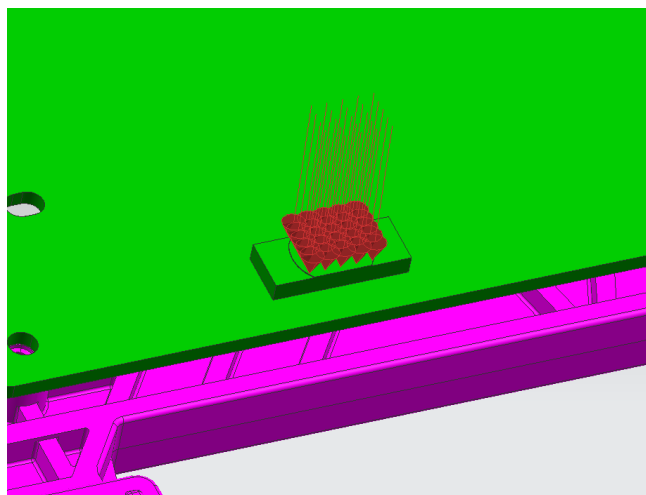


Figura 3.10 – Aplicação da carga em área semelhante a um dedo.

3º. Cenário

Especificidade deste terceiro teste prende-se com a alteração dos blocos dos conetores cujo material foi substituído por um plástico comum (PP), e com ligação à placa por adesivo. O objetivo foi analisar os resultados para a placa com os conetores em material mais flexível.

3.8 Método de recolha de resultados

Para facilitar a visualização dos resultados, foram criadas na superfície da placa pequenos paralelepípedos, com o formato das células de carga, Figura 3.11. O objetivo é apenas facilitar a visualização das áreas onde as deformações foram medidas. A localização de cada um dos sensores está indicada na Figura 3.12 e na Figura 3.13, estas são as posições onde foram colocados os extensómetros no teste físico.

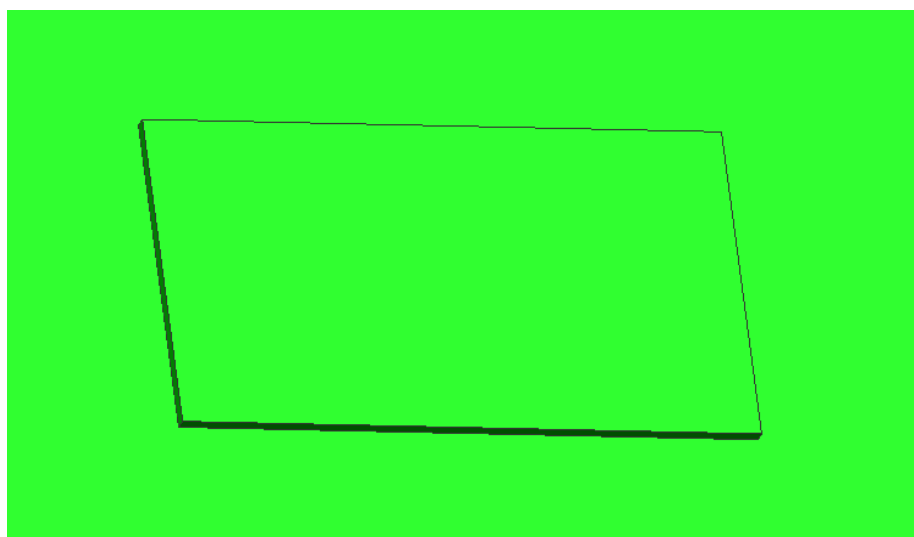


Figura 3.11 – Pormenor da geometria das células.

Desta forma, a aquisição dos valores tornou-se mais simples, contudo, a existência dos paralelepípedos provoca nas suas extremidades perturbações nas deformações medidas, estas perturbações devem-se sobretudo às tensões localizadas devido às perturbações na geometria.

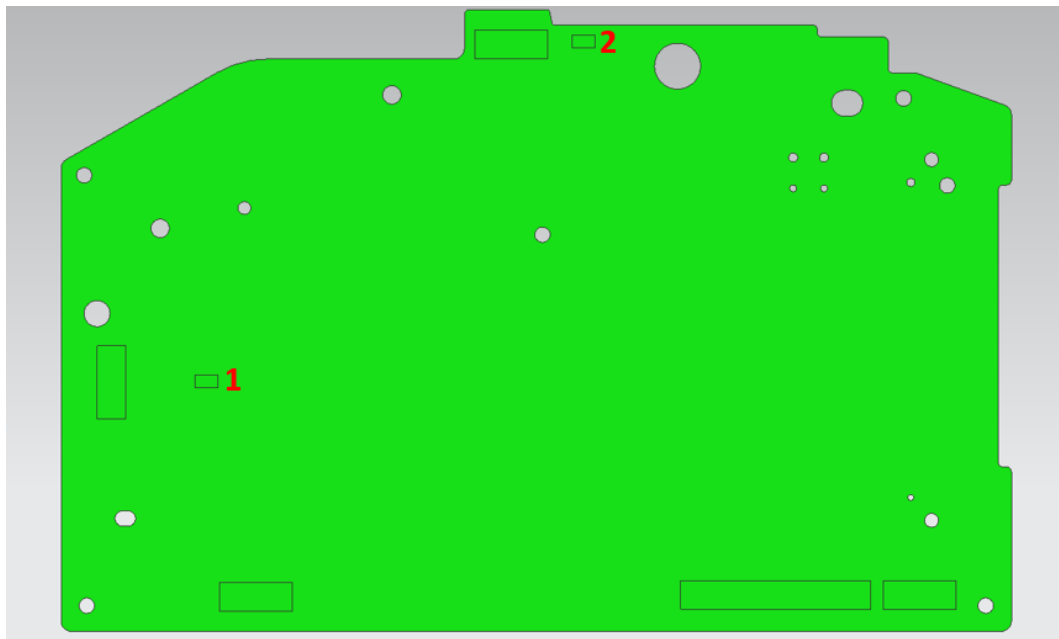


Figura 3.12 – Localização dos sensores no lado frontal da placa.

Para contornar esta situação, foram retirados os valores nos pontos centrais das áreas definidas. Utilizando as ferramentas do programa foi possível selecionar a área central da superfície dos corpos criados, obtendo assim, o resultado sob a forma de uma média calculada para os valores dos pontos centrais, neste caso as médias foram calculadas em cerca de 90 nós para cada “sensor”. Na Figura 3.14 não são demonstrados todos os pontos, sendo que estes pontos à superfície da placa pertencem a vários elementos.

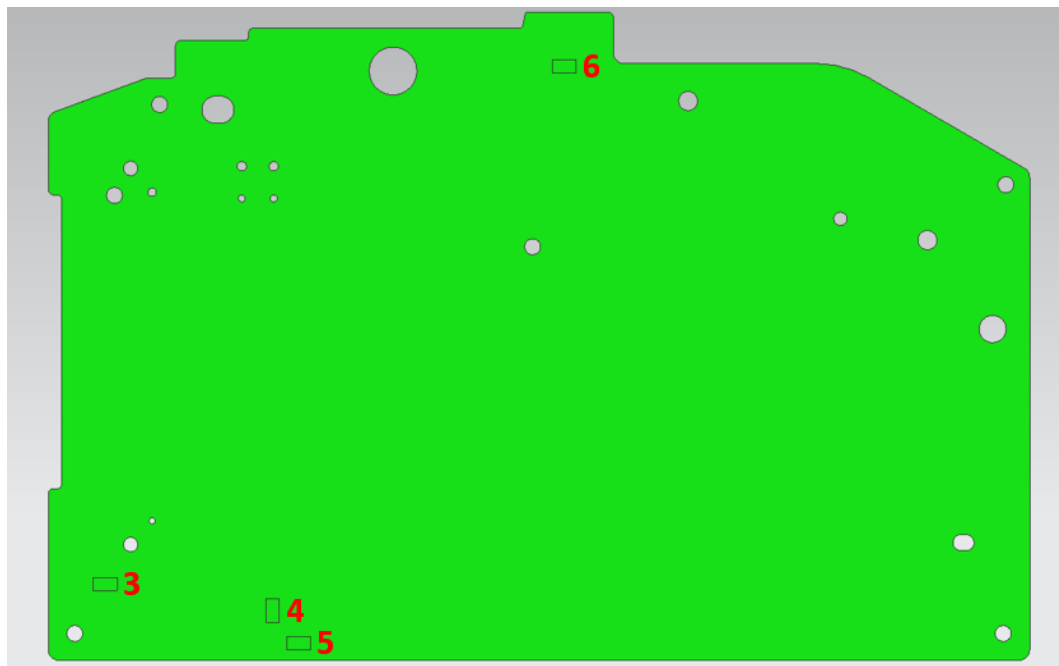


Figura 3.13 – Localização dos sensores no lado traseiro da placa.

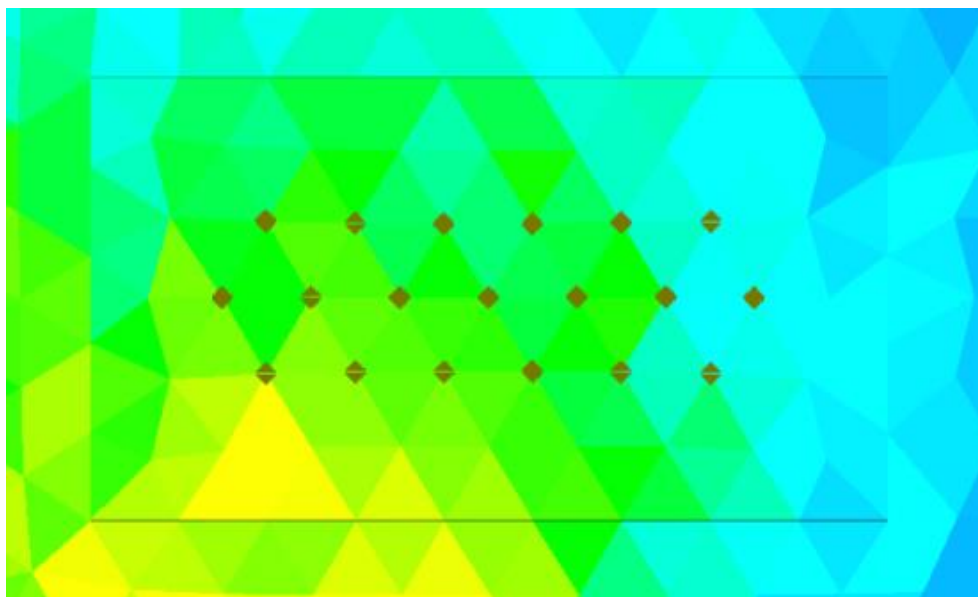


Figura 3.14 – Nós selecionados para obtenção de resultados.

Os resultados foram recolhidos através das soluções produzidas pelo programa, para cada sensor, foram retirados os valores correspondentes à deformação no sentido em que este estava colocado na placa. O sentido de colocação dos sensores é o mesmo em que estão dispostos os componentes críticos alvo da análise.

3.9 Sumário

Este capítulo serve de contextualização às simulações realizadas, descrevendo as considerações tomadas, os parâmetros e especificações sobre o teste que se pretende simular, servindo assim, de introdução ao capítulo 4, onde se podem observar os resultados obtidos.

Os cenários considerados no último subcapítulo, servem de base às simulações I, II e III, cada uma delas realizada com os mesmos parâmetros de simulação para averiguar qual o cenário que produz os melhores resultados em termos de precisão e tempo.

4 Análise de resultados

Neste quarto capítulo inicialmente são demonstrados os resultados obtidos a partir do teste físico realizado pela equipa de validação do processo, o qual permite conhecer as deformações e a solicitação envolvidas. É também descrito o método através do qual se procedeu a recolha dos resultados.

Mais à frente são expostos os resultados obtidos pelas simulações, onde se observam os parâmetros utilizados, os resultados obtidos pelo *software*, a sua comparação com o resultado do teste prático, e ainda o tempo decorrido para cada simulação.

É também possível observar as imagens produzidas pelo *software*, as quais permitem perceber de que forma a deformação está distribuída na placa.

Por fim são expostas as conclusões retiradas das simulações efetuadas.

4.1 Teste prático

O teste realizado na placa de circuitos, utilizando o dinamómetro, produziu os resultados demonstrados na Figura 4.1. Assinalado a amarelo, o valor de 500 $\mu\text{m/m}$, representa o ponto que uma vez atingido por algum dos sensores, neste caso o sensor 3, determina a paragem do teste para verificar a força exercida.

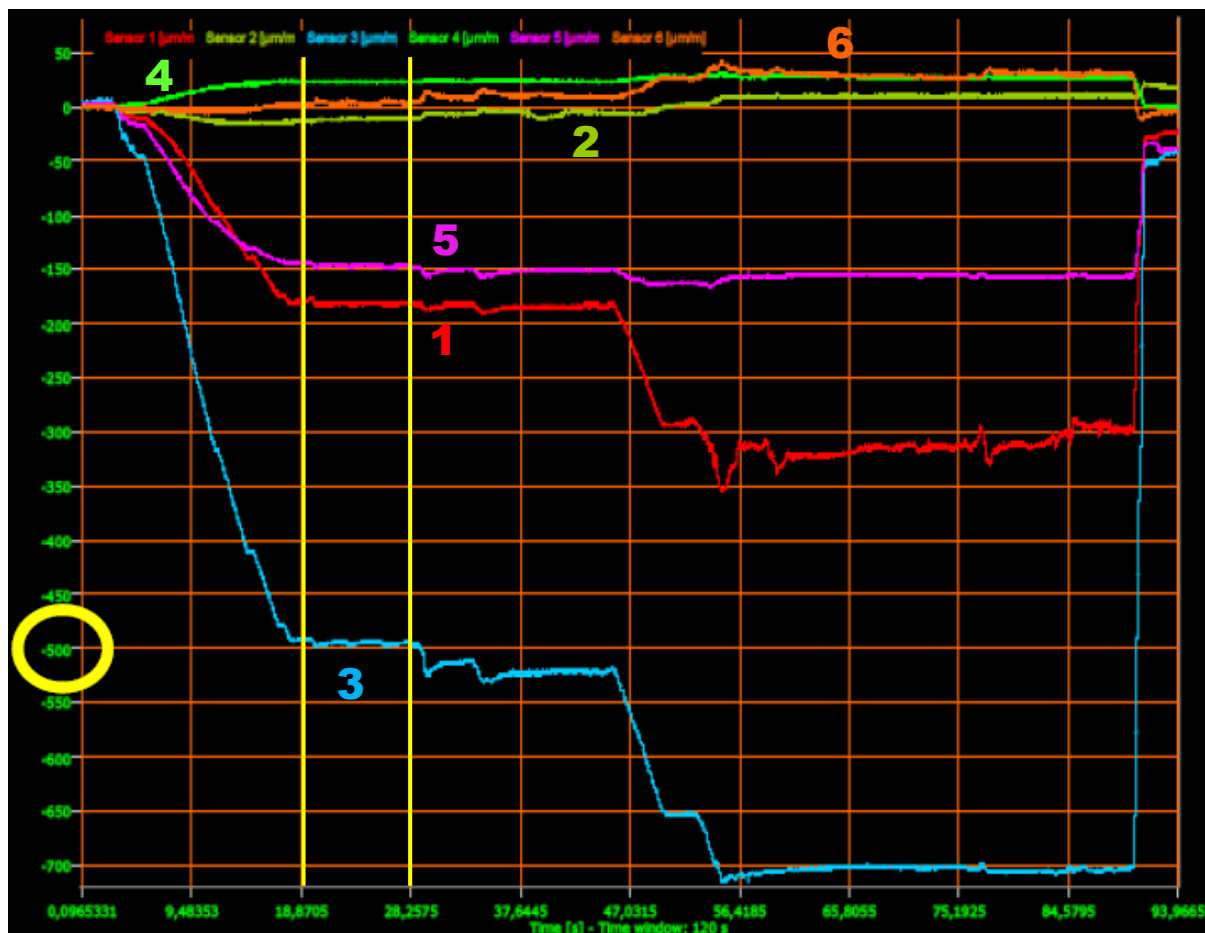


Figura 4.1 – Gráfico dos resultados do teste físico.

O valor para cada sensor, considerado entre as linhas amarelas da Figura 4.1, intervalo para o qual é aproximadamente constante o valor de 500 $\mu\text{m/m}$ no sensor 3, estão explicitados (em valores aproximados) na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados do teste prático.

Sensor	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)
1	-180
2	-20
3	-500
4	30
5	-150
6	0

Por se ter obtido um valor nulo para o sensor nº 6, este não é considerado nas simulações.

4.2 Simulação I

A primeira simulação foi realizada, considerando o primeiro cenário, de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de teste, simulação I.

Força aplicada	Dimensão característica dos Elementos (mm)		Tipo de elemento
	<i>Supporting plate</i>	PCB	
78.3	1	0.5	CTETRA4

Nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 podem observar-se os perfis de deformação da placa segundo as direções x e y , para a simulação I.

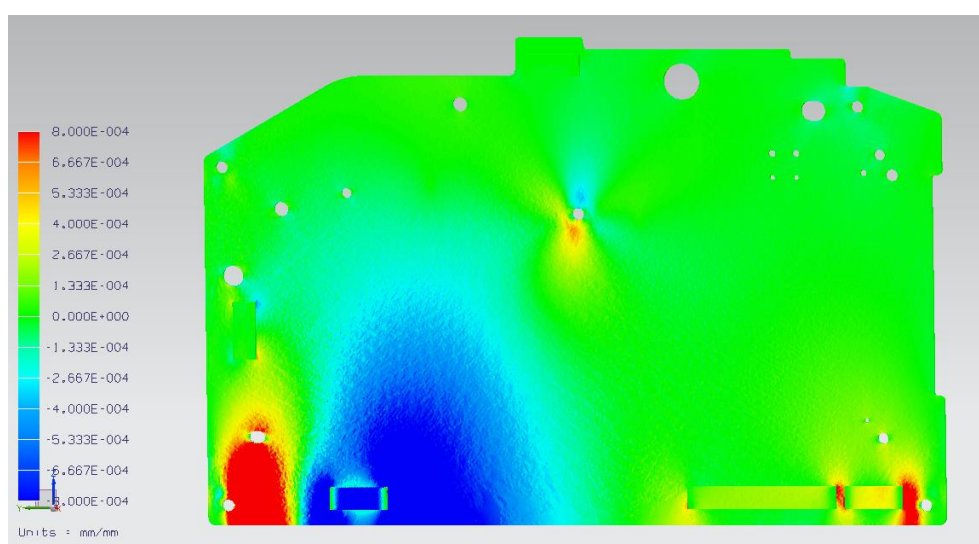


Figura 4.2 – Deformação da face frontal na direção x , simulação I.

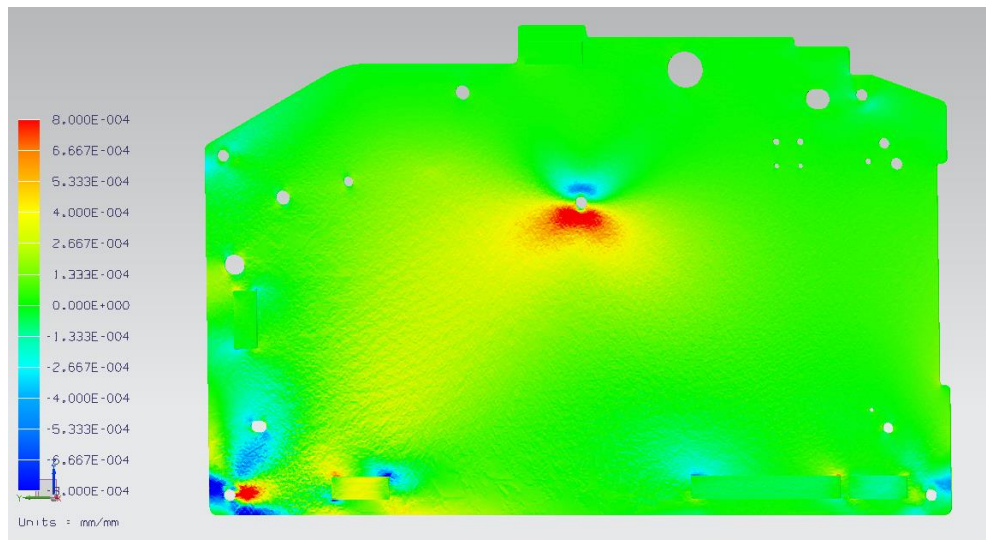


Figura 4.3 – Deformação da face frontal na direção y, simulação I.

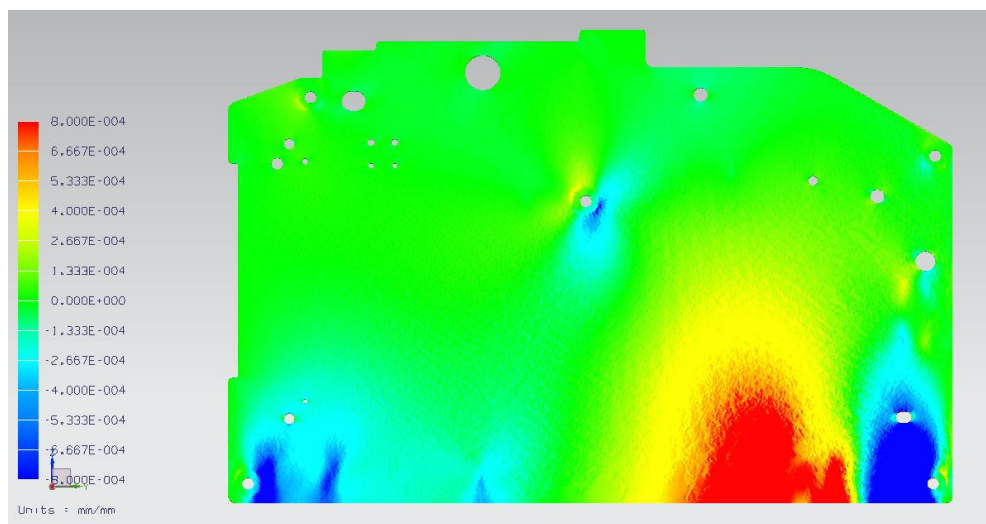


Figura 4.4 – Deformação da face traseira segundo x, simulação I.

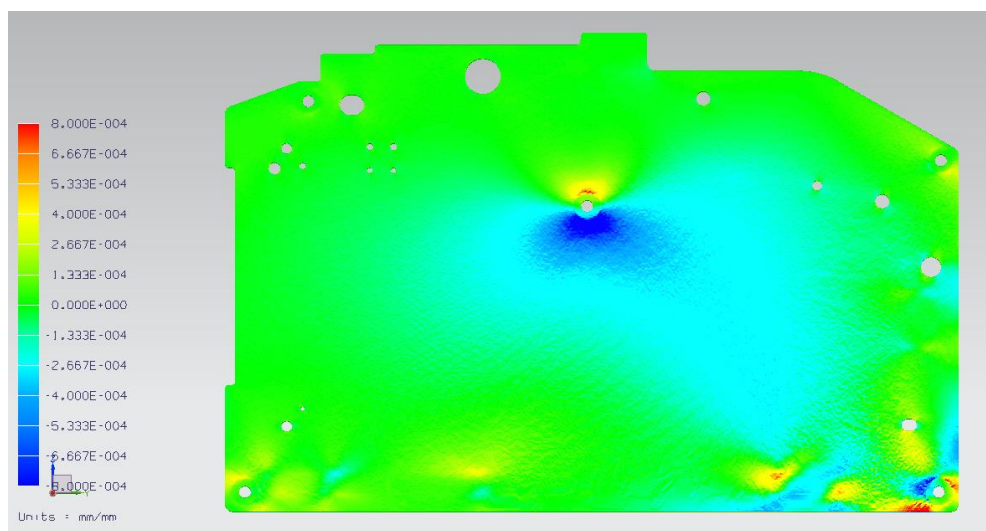


Figura 4.5 – Deformação da face traseira da placa segundo y, simulação I.

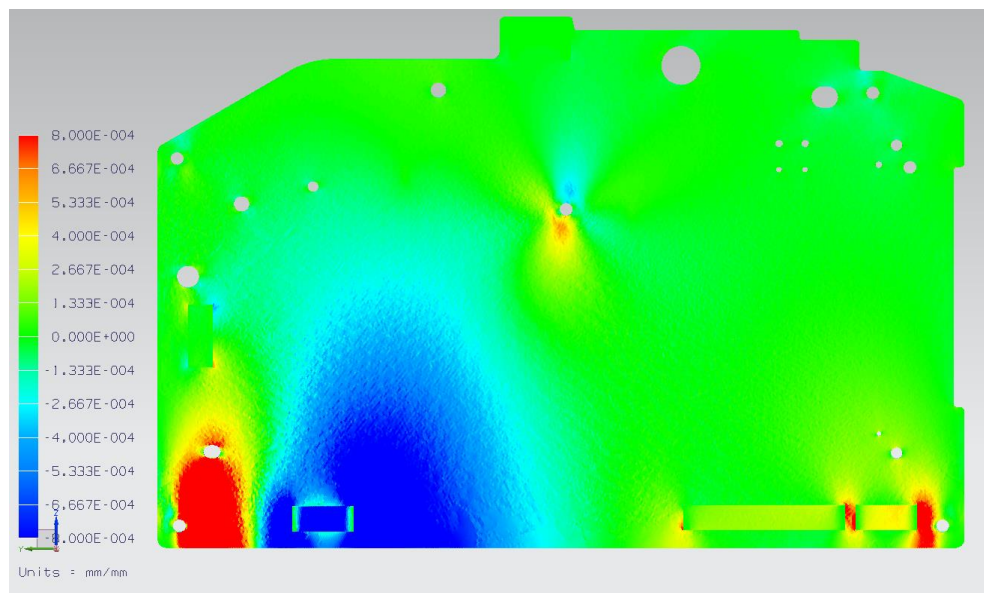
Tabela 4.3 – Resultados da simulação I.

Sensor	Direção	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)		Erro (%)	Tempo decorrido
		Simulação	Medição		
1	X	-159	-180	11.7	1h 20m
2	X	-35	-20	75	
3	X	-490	-500	2	
4	Y	53	30	76.7	
5	X	-152	-150	1.3	

4.3 Simulação II

A segunda simulação foi realizada conforme o segundo cenário, testando o efeito de concentrar a solicitação numa área semelhante à de um dedo, com parâmetros semelhantes à anterior.

Nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 podem observar-se os perfis de deformação da placa segundo as direções x e y .

Figura 4.6 – Deformação da face frontal na direção x , simulação II.

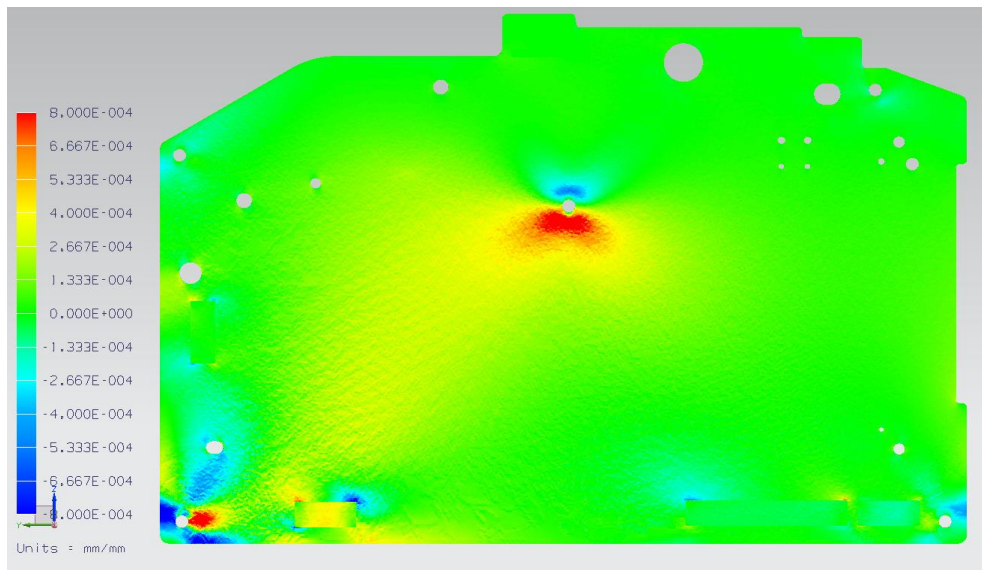


Figura 4.7 – Deformação da face frontal na direção y , simulação II.

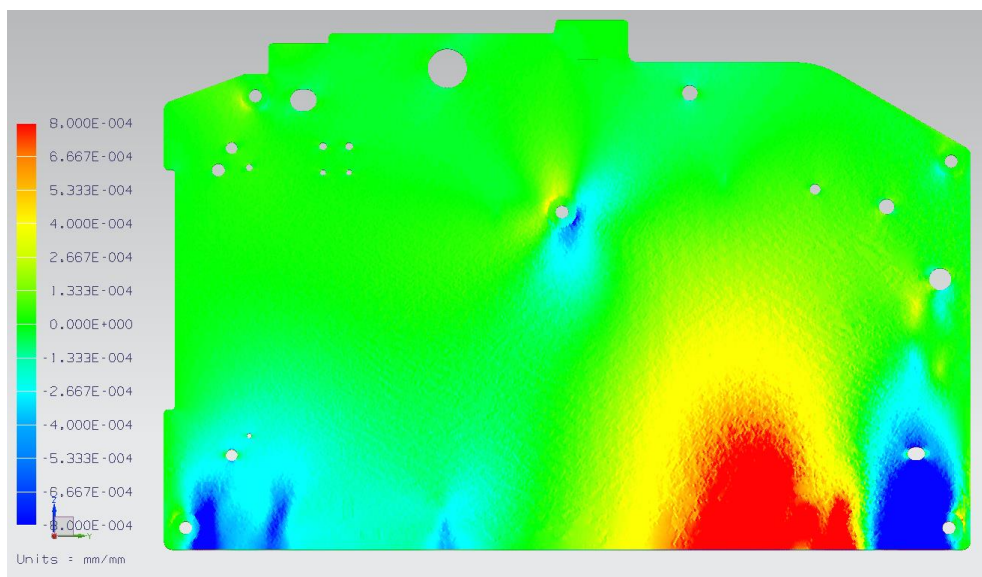


Figura 4.8 – Deformação da face traseira da placa segundo x , simulação II.

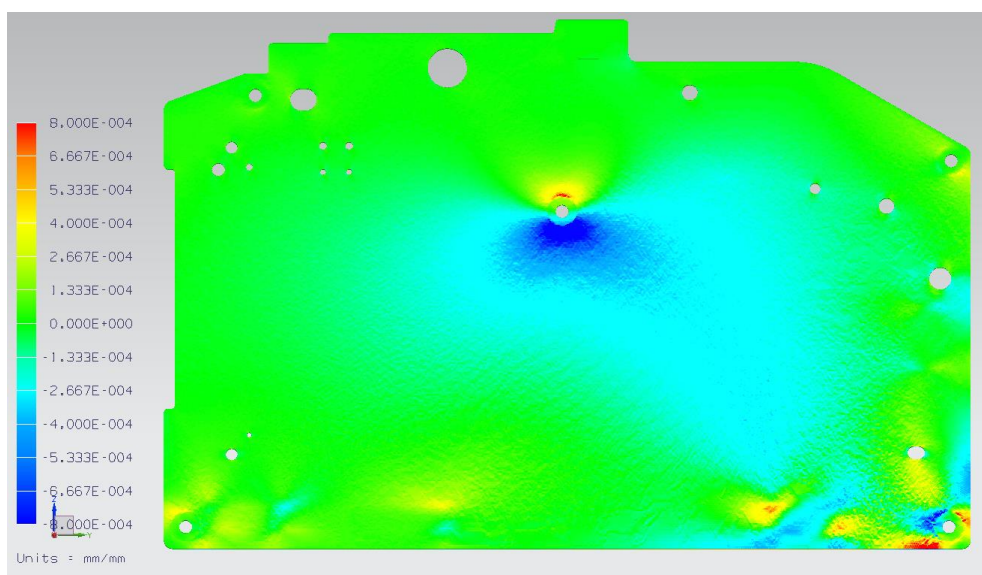


Figura 4.9-- Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação II.

Tabela 4.4 – Resultados da simulação II.

Sensor	Direção	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)		Erro (%)	Tempo decorrido
		Direção	Medição		
1	X	-159	-180	11.7	1h 19m
2	X	-36	-20	80	
3	X	-487	-500	2.6	
4	Y	52	30	73.7	
5	X	-152	-150	1.3	

4.4 Simulação III

Esta simulação baseia-se no terceiro cenário, com os conectores em plástico, com parâmetros semelhantes às anteriores.

Nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 podem observar-se os perfis de deformação da placa segundo as direções x e y , para a simulação III.

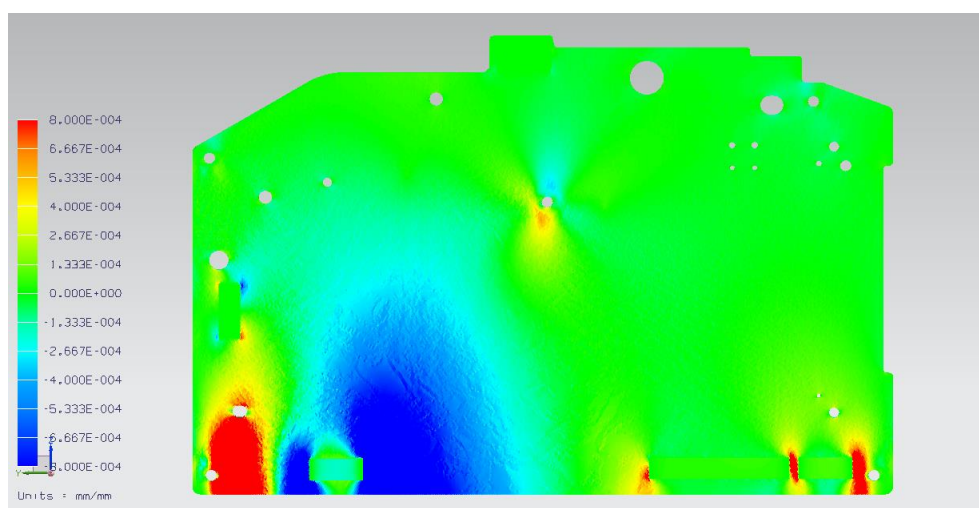


Figura 4.10 – Deformação da face frontal na direção x , simulação III.

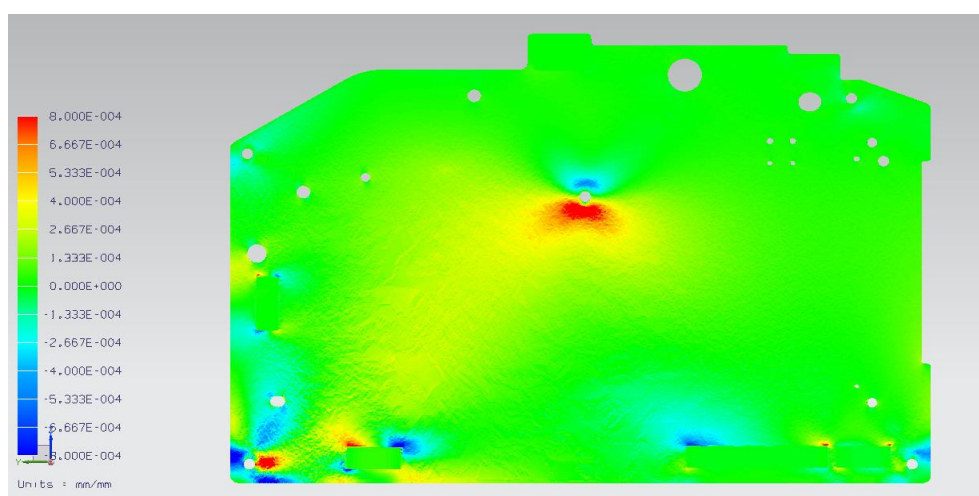


Figura 4.11 – Deformação da face frontal na direção y , simulação III.

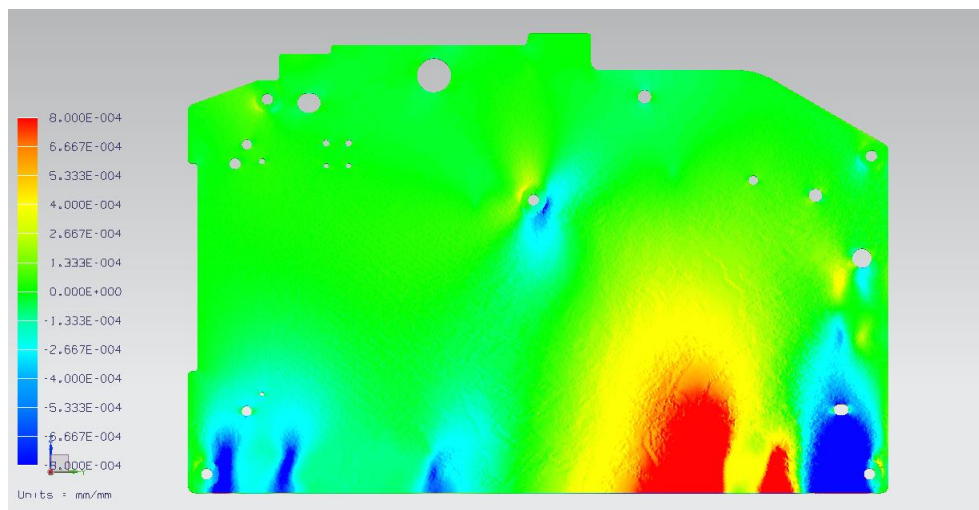


Figura 4.12 – Deformação da face traseira da placa segundo x, simulação III.

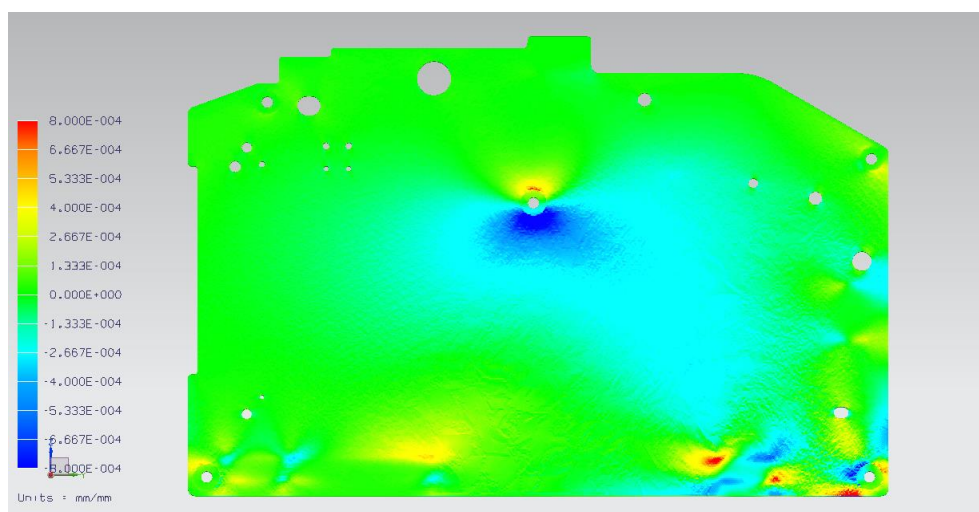


Figura 4.13 – Deformação da face traseira da placa segundo y, simulação III.

Tabela 4.5 – Resultados da simulação III.

Sensor	Direção	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)		Erro (%)	Tempo decorrido
		Simulação	Medição		
1	X	-137	-180	23.9	1h 43m
2	X	-34	-20	70	
3	X	-546	-500	9.2	
4	Y	77	30	156.7	
5	X	-91	-150	39.3	

4.5 Simulação IV

Esta simulação é realizada a partir do 1º cenário, com diferente tipo de elemento, o objetivo da alteração é avaliar a aproximação conseguida com um maior número de nós. Os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros de teste, simulação IV.

Força aplicada	Dimensão característica dos Elementos (mm)		Tipo de elemento
	<i>Supporting plate</i>	PCB	
78.3	1	0.5	CTETRA10

Nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 podem observar-se os perfis de deformação da placa segundo as direções x e y , para a simulação IV.

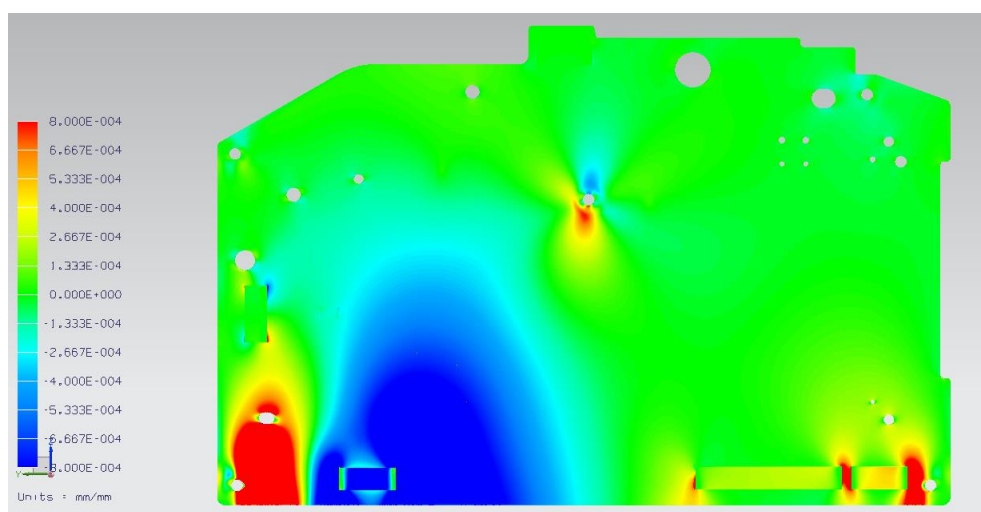


Figura 4.14 – Deformação da face frontal na direção x , simulação IV.

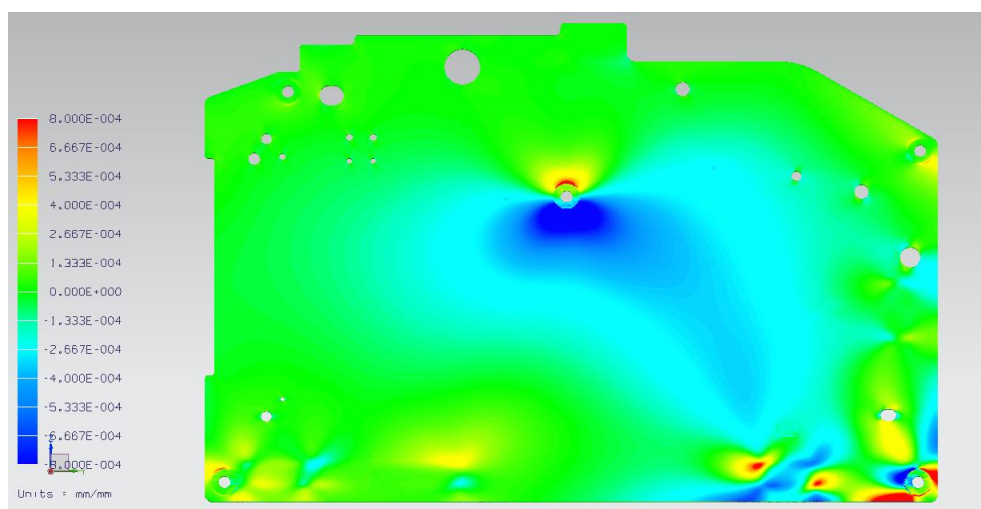


Figura 4.15 – Deformação da face frontal na direção y , simulação IV.

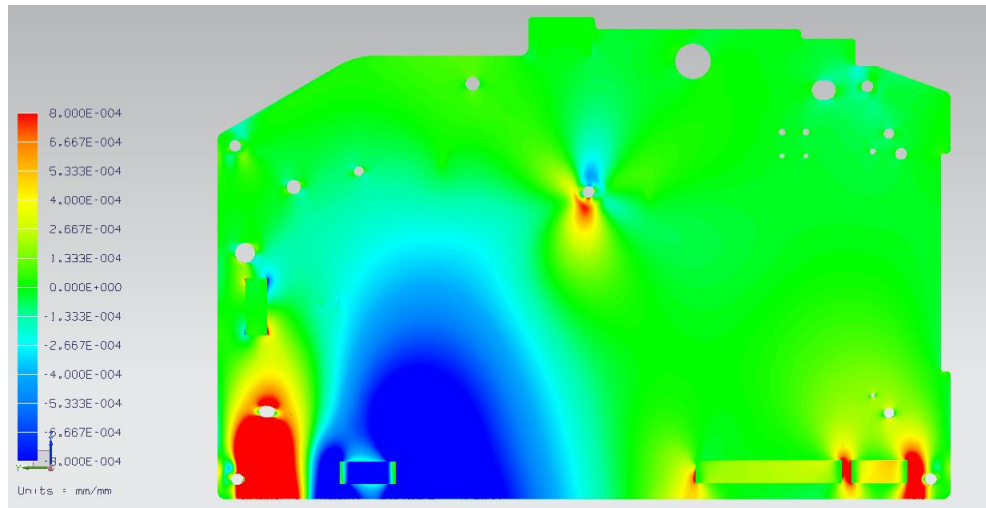


Figura 4.16 – Deformação da face traseira da placa segundo x , simulação IV.

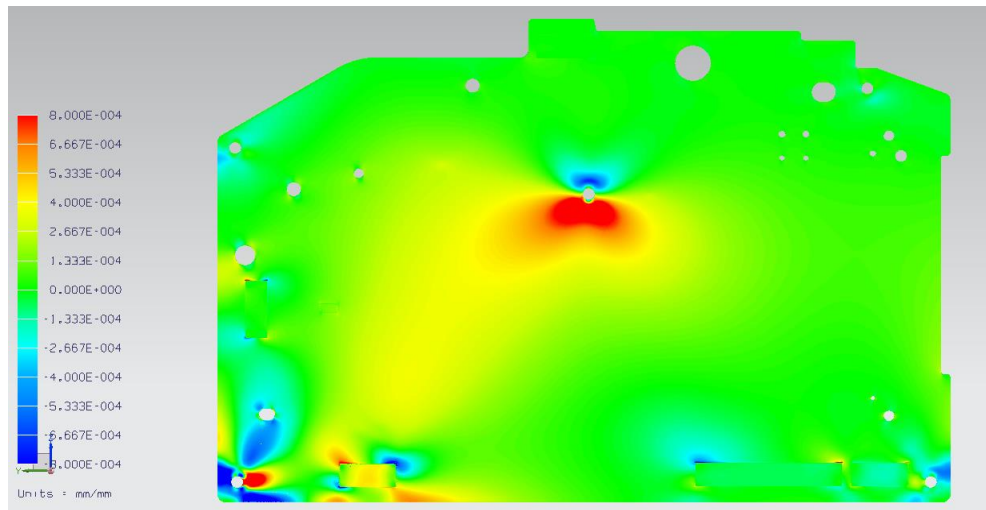


Figura 4.17 – Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação IV.

Na Tabela 4.7, podem ser observados os resultados obtidos nesta simulação.

Tabela 4.7 – Resultados da simulação IV.

Sensor	Direção	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)		Erro (%)	Tempo decorrido
		Simulação	Medição		
1	X	-169	-180	6.1	3h 47m
2	X	-33	-20	65	
3	X	-557	-500	11.4	
4	Y	63	30	110	
5	X	-154	-150	2.7	

4.6 Simulação V

Esta simulação pretende avaliar face à 1ª, o efeito de diminuir a dimensão característica dos elementos do PCB a metade, Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros de teste, simulação V.

Força aplicada	Dimensão característica dos Elementos (mm)		Tipo de elemento
	<i>Supporting plate</i>	PCB	
78.3	1	0.25	CTETRA4

Nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 podem observar-se os perfis de deformação da placa segundo as direções x e y , para a simulação V.

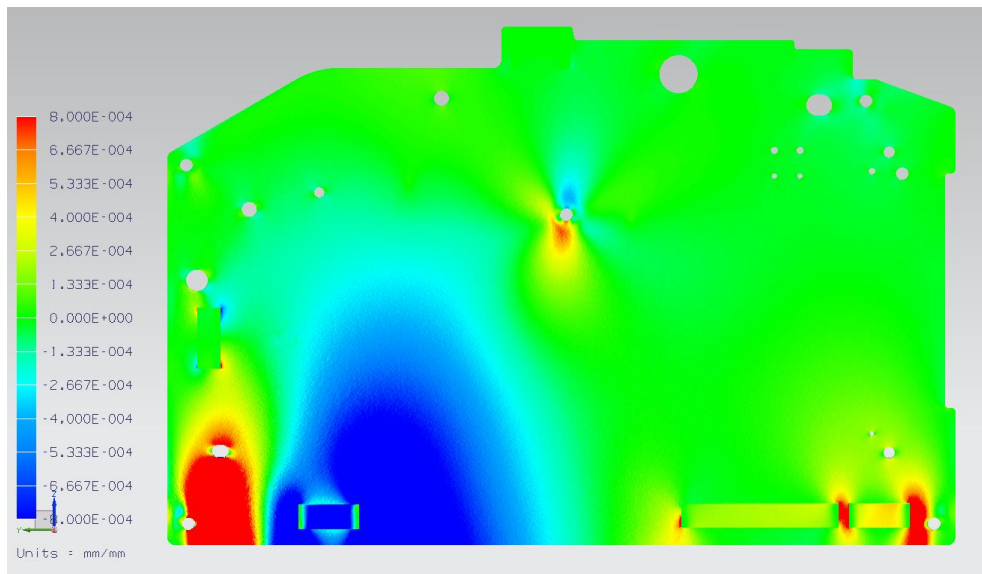


Figura 4.18 – Deformação da face frontal na direção x , simulação V.

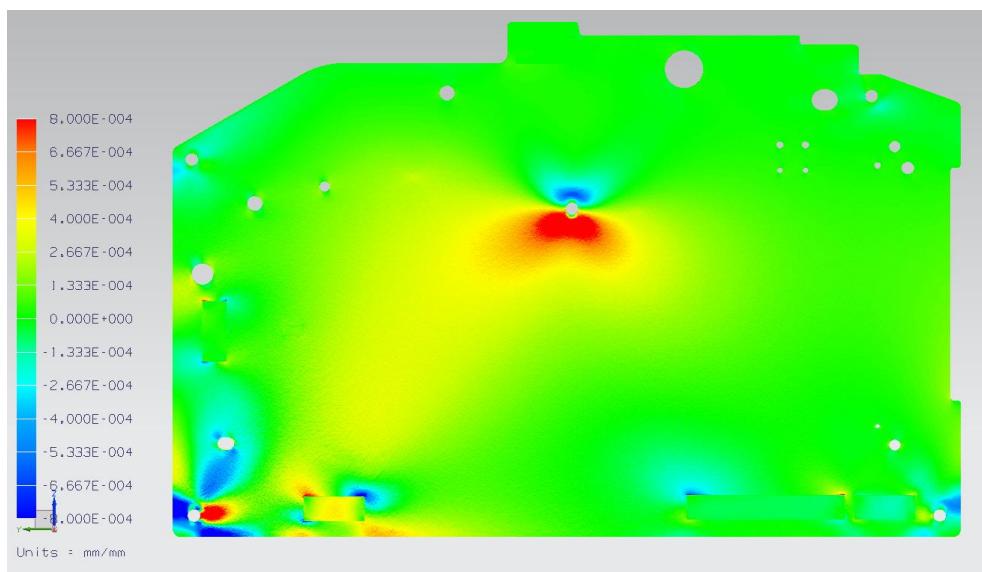


Figura 4.19 – Deformação da face frontal na direção y , simulação V.

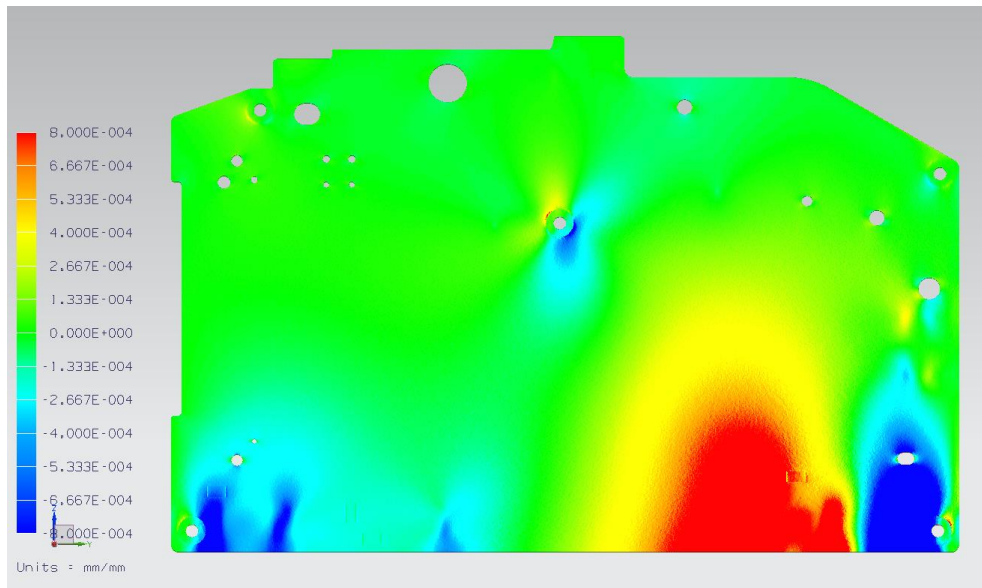


Figura 4.20 – Deformação da face traseira da placa segundo x , simulação V.

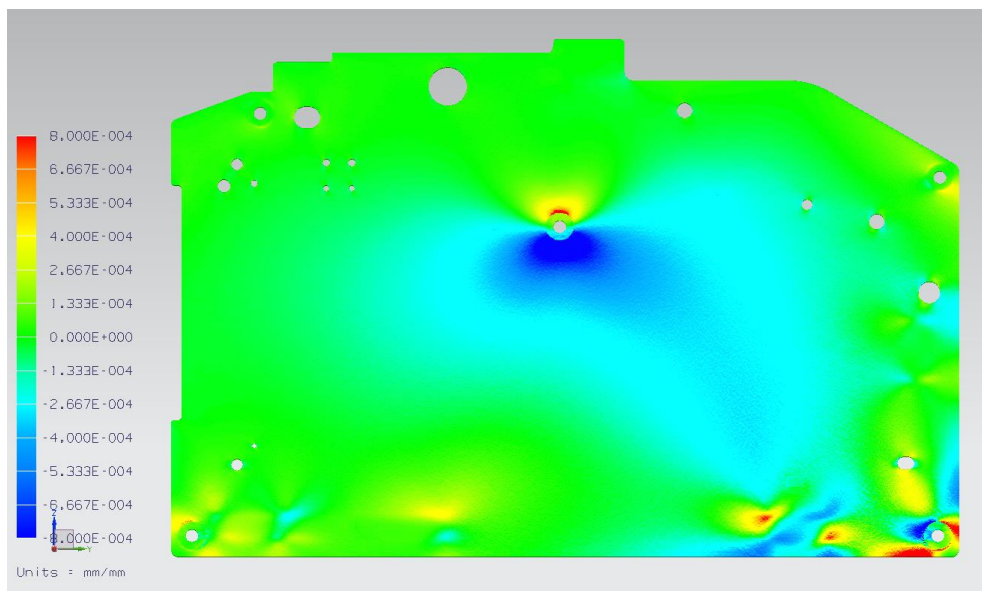


Figura 4.21 – Deformação da face traseira da placa segundo y , simulação V.

Na Tabela 4.9, podem ser observados os resultados obtidos nesta simulação.

Tabela 4.9 – Resultados da simulação V.

Sensor	Direção	Deformação ($\mu\text{m}/\text{m}$)		Erro (%)	Tempo decorrido
		Direção	Medição		
1	X	-179	-180	0.5	
2	X	-35	-20	75	
3	X	-585	-500	17	
4	Y	63	30	110	
5	X	-159	-150	6	

4.7 Conclusões

Na é possível obter uma visão geral dos resultados proporcionados pelas várias simulações realizadas. A média dos erros obtidos foi calculada com o objetivo de quantificar o erro no panorama geral dos pontos onde os valores foram coletados. Em termos de tempo decorrido na simulação, este é apresentado em termos de proporção, uma vez que o mesmo poderá variar em função do *hardware*.

Como se pode observar, o erro menor foi verificado na simulação I, com o cenário de simulação mais simplificado.

Tabela 4.10 – Compilação de resultados das simulações.

		Simulação				
Sensor		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Erro (%)	1	11.7	11.7	23.9	6.1	0.5
	2	75	80	70	65	75
	3	2	2.6	9.2	11.4	17
	4	76.7	73.7	156.7	110	110
	5	1.3	1.3	39.3	2.7	6
Média		33.3	33.9	59.8	39.0	41.7
Desvio Padrão		34.9	35.3	52.5	42.1	43.3
Tempo decorrido (%)		100	99	179	284	286

Este deverá ser o método adotado para futuras simulações, uma vez que proporciona os melhores resultados utilizando o menor espaço de tempo. Ainda que o tempo decorrido para a simulação seja um pouco maior, esta diferença é dissipada pelo maior tempo de preparação necessário ao utilizar o 2º cenário. Analisando os restantes resultados, podemos observar que a simulação II, obtém resultados muito próximos da primeira, facto justificável devido à elevada semelhança entre os dois cenários de simulação, assim se obtiveram resultados semelhantes num espaço de tempo semelhante.

A simulação III por sua vez revela os piores resultados, demonstrando que a hipótese de considerar os conectores um plástico comum não é viável, uma vez que foram obtidos resultados significativamente piores, e demorando mais tempo a concretizar a simulação.

No que diz respeito à simulação IV, esta foi realizada com os parâmetros da primeira, com um tipo de elemento diferente, o qual possui um mais elevado número de nós. Esta alteração teve a esperada consequência de um acréscimo acentuado no tempo de simulação, próximo das 4 horas face ao tempo de 1 hora e 20 minutos da primeira simulação, acréscimo este justificável pelo maior número de equações do sistema. Os resultados da simulação no entanto, afastaram-se, em média, dos resultados medidos, este afastamento poderá dever-se ao maior impacto das simplificações efetuadas no modelo da placa.

A simulação V enquadra-se nos resultados da simulação IV, existe uma maior proximidade para algumas posições, porém do ponto de vista geral a aproximação não é tão boa como na primeira simulação.

Os resultados alcançados permitem concluir que a simulação I deverá ser aquela a ser adotada no futuro. A simplicidade na preparação da simulação e a celeridade com que é possível

executá-la, por si só já são uma mais-valia face às restantes, o facto de os resultados serem mais aproximados aos verificados na placa, tornam esta a opção ideal.

Os resultados das restantes simulações considerando o mesmo cenário, onde é executado um refinamento da malha, são um pouco aquém das expectativas. Seria de esperar que com uma malha mais refinada os resultados tivessem uma maior precisão, contudo é necessário ter em conta que a inexistência dos componentes da placa e da sua ligação à mesma, influenciam o comportamento da mesma. A presença de conetores de grande dimensão e com geometrias de elevada resistência á flexão certamente influenciam o comportamento do PCB nas áreas onde estes componentes estão fixados. Desta forma, o afastamento dos resultados é justificável pela perda de precisão aquando da simplificação.

É também relevante referir que a influência do *hardware* nas simulações é significativa na rapidez com que as mesmas podem ser executadas.

Neste caso foi utilizado um computador *desktop*, HP Z420 Workstation. Apesar das elevadas capacidades deste equipamento, é de considerar que a configuração do mesmo, nomeadamente a configuração de rede e o *software* de controlo dos computadores utilizado pela empresa, poderá possivelmente ter contribuído para que o equipamento não disponibilizasse em pleno a sua *performance*, e assim os tempos registados poderão estar influenciados por este facto.

5 Estudo de colisões

Este capítulo pretende demonstrar a capacidade do *software* como ferramenta de análise para suportar a equipa na avaliação de amostras.

Este capítulo consiste num enquadramento a utilização da análise de interferências nas atividades da equipa, na descrição do procedimento e num breve sumário.

5.1 Enquadramento

A necessidade de retrabalhar peças devido a problemas de colisão entre peças plásticas e componentes do PCB, é uma constante no trabalho da equipa. As colisões por vezes são difíceis de detetar, uma vez que podem ocorrer entre todo o tipo de peças.

A simulação de colisões torna-se particularmente útil quando surgem alterações às peças que compõem o produto. Neste caso a análise é feita a um produto, que na sua fase de amostras foi planeado utilizar os componentes de um outro, em estado de desenvolvimento mais avançado, uma vez que apenas era pretendido verificar o funcionamento do PCB e testar o *software*, assim, o planeado foi utilizar as peças e *display* de outro produto, uma vez que não estavam ainda disponíveis as peças de *design* do produto final.

As principais alterações encontravam-se no *main* PCB do novo produto, com um *layout* totalmente distinto do utilizado anteriormente. Desde cedo foi verificado que seria necessário retrabalhar as peças a ser utilizadas, uma vez que as mesmas impediam a correta montagem das unidades.

A análise de colisões permitiu desde logo perceber todas as alterações que seriam necessárias para criar condições de espaço para a montagem, bem como para suportar corretamente os componentes do produto.

5.2 Procedimento

O procedimento para a deteção de colisões baseia-se em utilizar uma função do programa que automaticamente executa a análise das peças em estudo, providenciando *feedback* visual que possibilita identificar nas peças as os componentes ou elementos das peças em colisão.

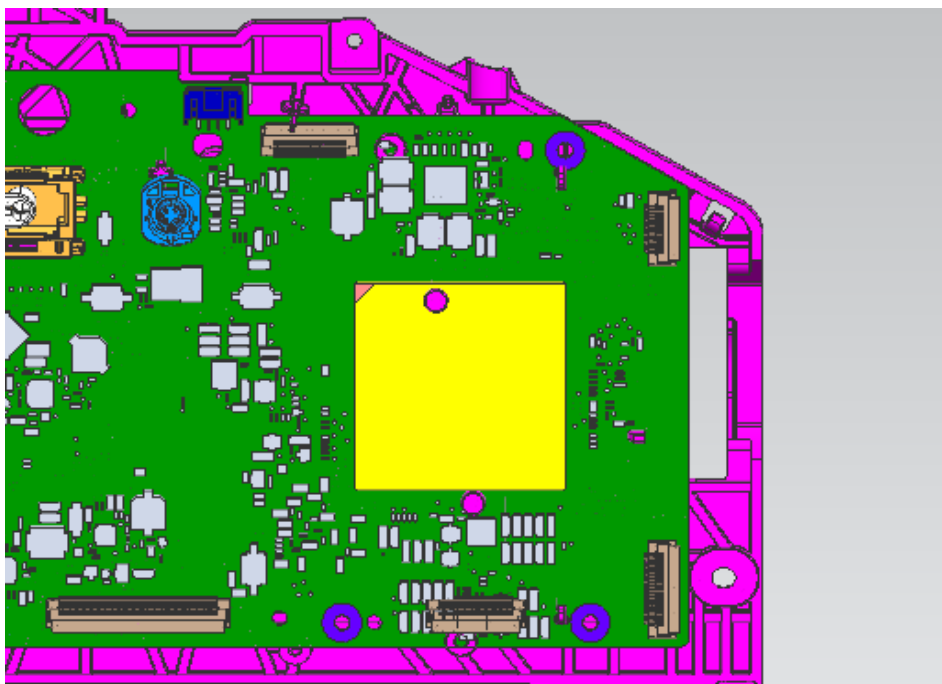


Figura 5.1 – Peças para análise de interferências.

Tendo posse destes requisitos, devemos utilizar a partir da barra de ferramentas de *assembly* a função *interference check*.

Dentro das funções disponíveis, será inicialmente definir o “set” de peças a analisar, que permite executar uma análise de todo o conjunto, ou apenas de determinados componentes do mesmo.

Na Figura 5.1, é possível ver que o PCB e seus componentes são atravessados por um apoio do *supporting plate*, o qual suportaria, na versão anterior, um segundo PCB posicionado acima do PCB principal.

A análise torna-se particularmente importante, uma vez que nem sempre as interferências são facilmente visíveis. A geometria das peças pode permitir que existam situações em que a interferência não atravesse as peças mas fique contida dentro da espessura das peças.

Na Figura 5.2, bem como na Figura 5.3, é possível observar, a vermelho, as geometrias correspondentes a colisões entre o PCB e o *supporting plate*. Esta análise permite com rapidez analisar quais as zonas das peças que necessitam de ser revistas ou retrabalhadas.

O *software* pode também identificar quais as zonas onde existe contacto, sem interferência, entre as peças analisadas. Esta possibilidade torna-se útil na verificação da existência ou não, de elementos em zonas não permitidas pelos documentos que regulamentam o *design* de peças ou PCB's.

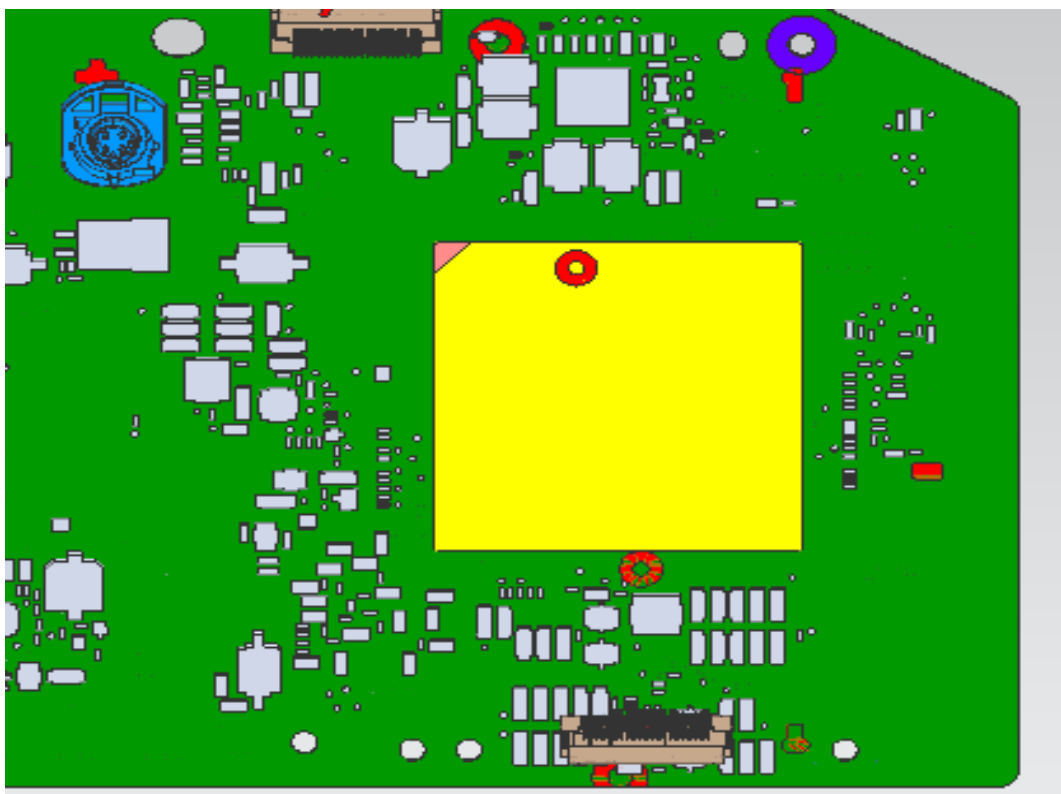


Figura 5.2 – PCB após a análise de interferência, a vermelho as zonas onde a mesma existe.

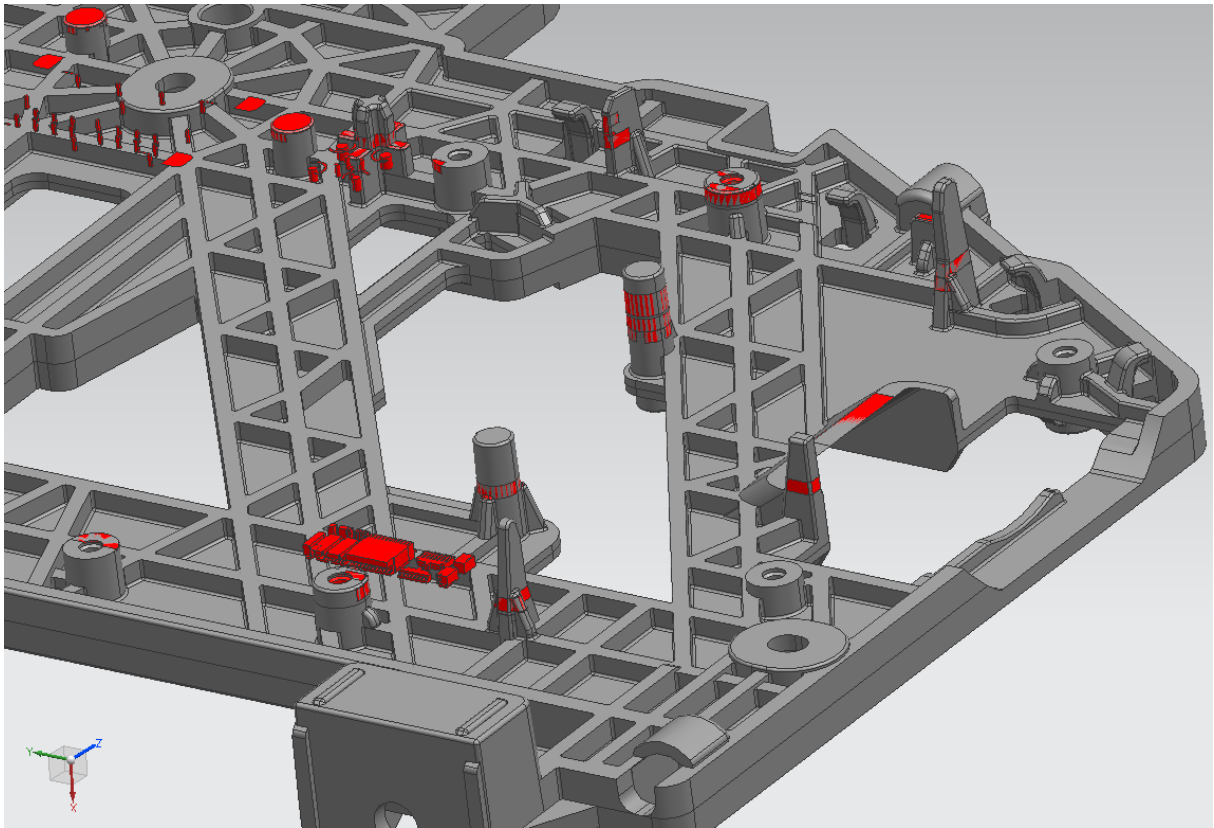


Figura 5.3 – *Supporting plate* após análise, a vermelho assinaladas as zonas de interferência.

5.3 Sumário

A celeridade com que esta análise é realizada, permite à equipa a avaliação rápida dos conjuntos em termos de colisões ou contactos, ao mesmo tempo que o faz de forma mais correta, uma vez que utilizando esta ferramenta, é eliminado o erro introduzido pela avaliação visual.

E possível à equipa utilizando a capacidade análise interferências, em conjunto com as capacidades de simulação do *software* prever as alterações necessárias às peças para eliminar as interferências.

6 Propostas de melhoria

Este capítulo como é indicado pelo próprio título, serve para apresentar uma proposta de melhoria à empresa, considerando uma fragilidade encontrada no teste de PCB *strain*. Está dividido em seis subcapítulos, inicialmente é apresentado o problema, definido o objetivo, analisados estudos e trabalhos experimentais com o objetivo de fundamentar a proposta, e por fim elaborado um sumário onde são reunidas as conclusões retiradas.

6.1 Problemática

O teste de PCB *strain* determina a aprovação ou não, do produto no que diz respeito a possibilidade da placa de circuitos ser danificada durante o processo de montagem do produto.

O método para execução do teste baseia-se em colocar extensómetros na placa nas zonas onde existem componentes críticos, propícios a sofrer danos durante a montagem. De seguida o operador que executa o teste, pressiona os conetores onde serão ligadas *foils* ou porventura outros componentes inseridos manualmente.

Desta forma, a força aplicada nos conetores, representa o parâmetro chave no teste, no entanto, esta não apresenta um valor determinado. O executante exerce uma força não controlada sobre a placa.

É precisamente na aleatoriedade do teste que reside o problema, a força exercida no teste pretende prever a força que os operadores de linha podem exercer, o que salvaguarda possíveis danos à placa, porém, se a força exercida no teste for demasiado excessiva, pode significar que será necessário fazer alterações no produto, como por exemplo adicionar um ponto de apoio à placa, ou aproximar um castelo de aparafusamento.

Alterações de peças na fase do projeto em que se realiza este teste, implicam mudança do conceito mecânico por parte do desenvolvimento, e consequentemente alterações de moldes, ou processos de fabrico no fornecedor.

Todas estas possíveis alterações resumem-se em custos para o projeto, que surgem por indicação de um resultado, obtido através de um teste com baixo grau de repetibilidade.

6.2 Objetivo

O objetivo da proposta de melhoria é obter um valor base para a execução do teste, o qual salvasse danos e garanta a repetibilidade necessária para que o teste seja viável.

6.3 Análise de estudo demográfico

A determinação de um valor base para a força aplicada, não é facilmente alcançável. Existe uma grande variação demográfica nos operadores de linha, homens e mulheres, com faixas etárias alargadas, com diferentes estaturas e porte físico.

Alguns estudos sobre as forças desenvolvidas por humanos com as mãos foram executados ao longo dos anos.

Na área da engenharia, estes estudos são importantes na medida em que a avaliação feita a um espectro demográfico alargado, pode servir de base no *design* de peças, produtos ou estações de trabalho que envolvem esforços manuais. Desta forma acautelando o desconforto na utilização dos equipamentos, ou mesmo casos em que a aplicação de esforços repetitivos pode causar problemas de saúde. (Astin 1999)

O estudo demográfico realizado por Angela DiDomenico Astin, na *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, na área da engenharia industrial, teve como

objetivo avaliar as forças máximas exercidas por uma amostra de 100 pessoas, em vários tipos de esforço, nomeadamente;

- *Poke* (dedo indicador) – força exercida com a ponta do dedo, com a palma da mão virada para baixo, e o indicador alinhado com o pulso (Figura 6.1);



Figura 6.1 – Aplicação de força em *poke*.

- *Press* (dedo indicador) – força exercida com a palma da mão virada para baixo e com o indicador alinhado com o pulso (Figura 6.2);

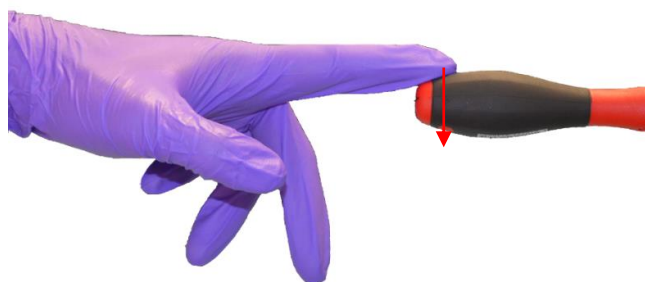


Figura 6.2 – Aplicação de força tipo *press*.

- *Pull* (dedo indicador) – força exercida com a palma virada para baixo e o indicador dobrado a um ângulo de 90° na falange central (Figura 6.3);



Figura 6.3 – Aplicação de força em *pull*.

- *Lateral pinch* – força exercida com a palma virada para dentro, em relação ao corpo, com o polegar a opor-se à falange central do dedo médio, o qual permanece suportado pelos restantes dedos (Figura 6.4)



Figura 6.4 – Aplicação de força por *lateral pinch*.

- *Chuck pinch* – força exercida com a palma virada para baixo, opondo o polegar aos dedos médio e indicador (Figura 6.5).



Figura 6.5 – Aplicação de força por *chuck pinch*.

- *Palmar pinch* – força exercida com a palma virada para baixo, opondo o dedo polegar ao indicador (Figura 6.6).



Figura 6.6 – Aplicação de força por *palmar pinch*.

Os resultados obtidos por Astin são demonstrados na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 – Resultados de testes de força.

		<i>Poke</i>	<i>Press</i>	<i>Pull</i>	<i>Lateral</i>	<i>Chuck</i>	<i>Palmar</i>
Homens	Média (N)	52.58	50.90	70.84	97.02	95.37	62.88
	Desvio (N)	18.01	18.37	27.16	27.67	28.26	19.20
	Variação (%)	34.25	36.08	38.34	28.52	29.63	30.54
Mulheres	Média (N)	39.31	35.20	49.33	64.84	64.13	45.45
	Desvio (N)	14.94	14.93	17.71	17.52	19.94	13.90
	Variação (%)	38.00	42.42	35.91	27.02	31.10	30.59

Estes resultados demonstram diferente capacidade de homens e mulheres em exercer forças com os dedos, em diferentes contextos. No caso que analisamos, os contextos mais semelhantes à operação de colocação das *foils* e fecho do conectores, serão os esforços de *poke* e *press*. De notar ainda que estes valores correspondem a forças máximas exercidas pelas pessoas que participaram no estudo, sem repetibilidade. Ao invés do que sucede na linha de produção.

As equipas de montagem na produção, em termos demográficos são, maioritariamente constituídas por mulheres, no entanto, para efeitos de teste, deve ser aqui considerado o pior caso segundo este estudo, ou seja, deve considerar-se os 52.58 N para homem em esforço de *poke*.

6.4 Análise de avaliação ergonómica

Com o auxílio do departamento de ergonomia da fábrica, foi possível obter alguma informação adicional para o estudo deste problema.

Utilizando *software* interno, foi possível calcular qual seria o pior dos casos para um esforço atingido com os dedos, utilizando o método de *Schultetus*, utilizado para fazer análise de risco para os operadores ao executar diferentes esforços de forma continuada.

O método calcula os limites de esforço de acordo com:

- Fatores pessoais (sexo, idade, condição física);
- Tipo de esforço, estático (duração > 4s) ou dinâmico (duração < 4s);
- Zona do corpo sujeita ao esforço, sistema braço-mão ou sistema mão-dedo;
- Frequência de realização (nº de repetições por dia);
- Ponto de aplicação da força, (considerando a distância, altura e direção).

Foi executada uma análise através do *software* considerando os seguintes dados:

- Fatores pessoais: homem, 44 anos, condição física mediana;
- Tipo de esforço: dinâmico;
- Zona do corpo: sistema mão-dedos;
- Frequência: 1x/dia;
- Ponto de aplicação: não especificado.

Segundo esta avaliação, representativa de um caso com condições que possibilitam uma força permitida maior, os resultados obtidos revelam que poderia neste caso ser exercida uma força de 74 N, com o polegar, sem que houvesse riscos para o operador, do ponto de vista ergonómico.

6.5 Avaliação da força de fecho de um conector

Para avaliar a força necessária para fechar um conector, procedeu-se inicialmente à pesquisa do documento de especificação do fornecedor do conector, para perceber qual a recomendação para o fecho das mesmas.

Segundo a especificação, o fecho dos conectores deve ser realizado aplicando o mínimo de pressão possível, girando o *flap* do conector em torno do seu eixo de rotação, como ilustrado na Figura 6.7.

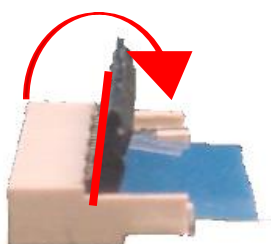


Figura 6.7 – Movimento ideal de fecho do conector.

Após a análise da especificação foi realizado um teste no laboratório de metrologia, utilizando um dinamómetro para exercer força no conector, procurando medir o máximo de força para completar o fecho do conector.

No entanto, não foi possível aplicar a força da mesma forma como descrito anteriormente, a mesma por limitação do equipamento foi aplicada na vertical, como demonstra a Figura 6.8.

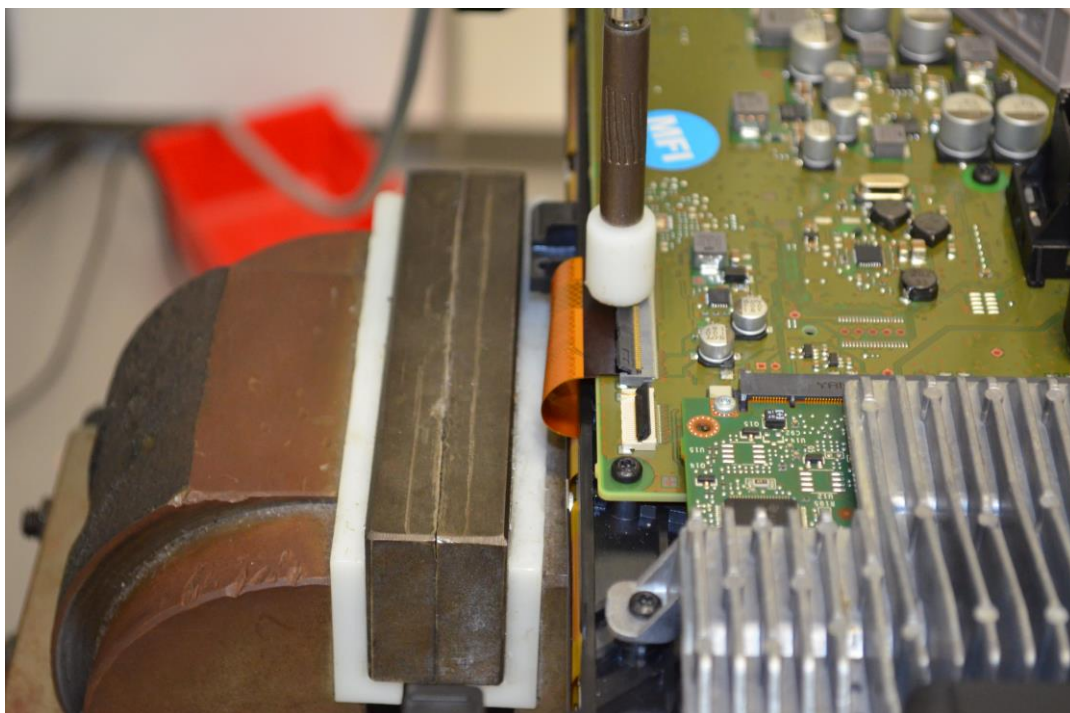


Figura 6.8 – Posicionamento da ponta de prova do dinamómetro, para fecho do conector.

Apesar desta limitação, o erro introduzido na atividade experimental, não fragiliza a análise a realizar, uma vez que, atendendo a forma em como a força foi aplicada, o resultado poderia eventualmente ser maior do que a necessária, se o conector fosse pressionado incorretamente. Foi também aplicada no dinamómetro uma ponta de prova em plástico, com o objetivo de minimizar o atrito entre as peças, permitindo ao conector escorregar para a sua posição final sem esforço.

O primeiro teste foi realizado para o fecho dos conectores na placa do produto AUDI TT, realizando o fecho dos conectores, com as *foils* colocadas na sua posição correta. Nestas condições foram obtidos os valores da Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Resultados do teste de fecho dos conectores.

Teste 1	9.2 N
Teste 2	9.3 N
Teste 3	10.5 N
Teste 4	8 N

Durante a recolha das informações anteriores, foi indicado por um colega do departamento de industrialização, que quando a *foil* esta mal posicionada, como é visível na Figura 6.9, os operadores podem exercer uma força superior intuitivamente para tentar fechar o conector. Esta informação motivou um segundo teste com o dinamómetro desta vez com a *foil* mal colocada, como mostra a figura.

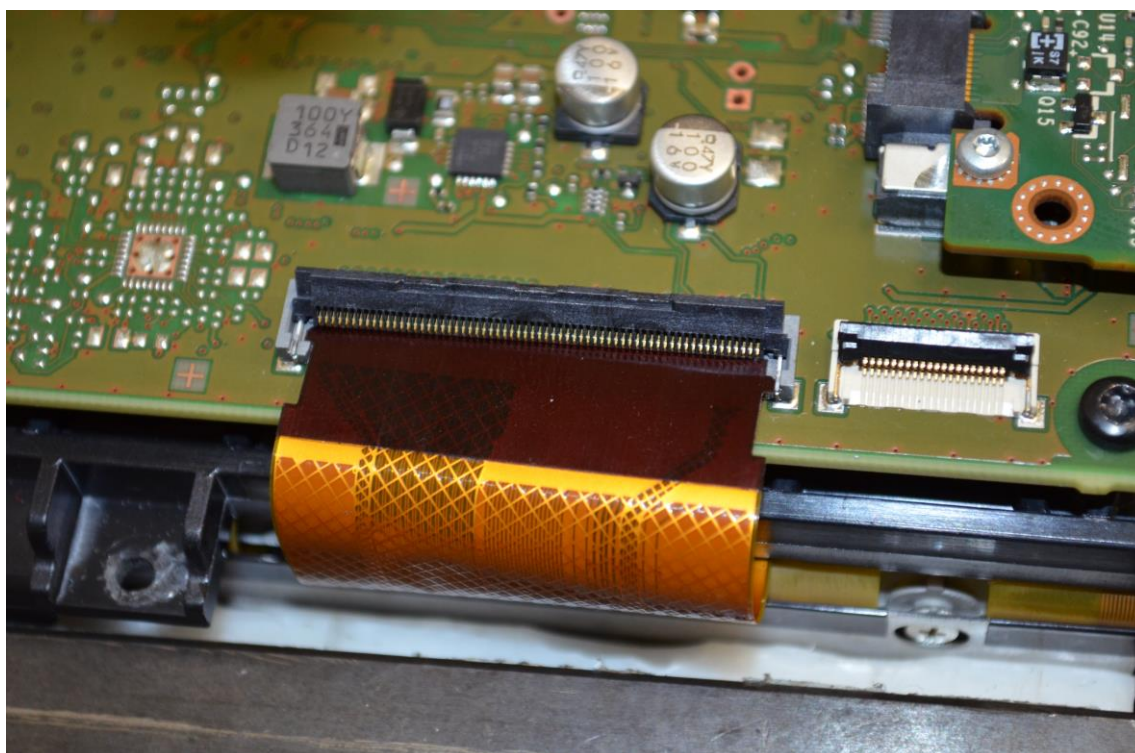


Figura 6.9 – Ilustração de uma *foil* mal posicionada no conector.

Este teste, contudo, não produziu resultados uma vez que com a *foil* mal posicionada, não é possível completar o fecho do conector, no entanto a título demonstrativo, foi possível atingir 50 N sem que o fecho fosse possível.

6.6 Sumário

Terminada a recolha de dados, procedeu-se a uma análise dos mesmos, com o objetivo de definir um valor específico para realização do teste de PCB *strain*, que permita executar o teste com maior clareza.

A partir do estudo de Astin, pode considerar-se que um homem conseguirá exercer a força máxima de cerca de 53 N, executando o esforço de *poke*, o qual serão mais adequado para comparar com o esforço aplicado neste caso. A avaliação ergonómica realizada pelo *software* da fábrica, mostra que para um homem mediano, 74 N será o valor máximo recomendado se este realizar a tarefa sem repetição. Os testes realizados com o dinamómetro revelaram que, a força necessária para fechar completamente um conector é de cerca de 11 N, ficando durante os testes, a sensação de que este valor tenda a ser exagerado considerando as condições de teste.

Nos valores obtidos, é possível observar uma grande diferença, entre a força que é fisicamente possível ou aconselhável de ser aplicada, e a força efetivamente necessária para efetuar o fecho dos conectores. Nesta análise, é necessário considerar que os valores obtidos a partir dos estudos, foram retirados considerando aplicação de força sem repetição, ou seja, estes valores serão superiores aos que seriam possíveis aplicar com repetição, onde a fadiga muscular tem influência na capacidade de exercer esforços, o que resulta em forças menores no panorama diário de um operador.

Foi também possível, através do manuseamento dos conectores, perceber que estes, ao fechar dão ao operador *feedback* positivo que torna perceptível o momento em que o conector fica total e corretamente fechado. Este fator promove o não pressionar excessivamente a placa, uma vez que apercebendo-se do fecho total do conector, o operador não necessita de exercer mais força sob a placa.

Tendo em conta todos os fatores, e considerando que e o âmbito que os valores foram obtidos, é possível afirmar, que um valor entre 50 N e 75 N é seguro para fazer o teste de PCB *strain*. De acordo com os testes realizados, no caso de a *foil* estar mal colocada, é perceptível, para o operador que a força que está exercer é atípica, uma vez que foram atingidos 50 N (5x mais do que o seria necessário em condições normais. Porém, para prevenir eventuais excessos motivados por operação anormal, um valor mais elevado deve ser tido em conta.

Foi também discutido, junto do departamento de formação de operadores, quanto à possibilidade de intervir junto dos operadores. Assim, deverá também ser considerada, a realização de formações de sensibilização para o tema da força aplicada, junto dos operadores de linha. Isto porque não é possível controlar a força exercida manualmente, porém é possível alertar os operadores para o risco de exercer força excessiva sobre os PCB's, permitindo assim, aumentar a segurança no valor escolhido, contribuindo também para a qualidade dos produtos.

A minha proposta é de que o valor padrão para realizar os testes inicialmente seja de 60 N, sendo que esta proposta deve ser avaliada pelos departamentos responsáveis da área de testes, passível de ser revista mediante a existência de outros fatores importantes que possam ter influência neste processo, os quais não tenham sido considerados.

7 Conclusão e trabalho futuro

Os seis meses de estágio na equipa de avaliação mecânica de amostras, proporcionaram uma larga aprendizagem daquilo que é o dia-a-dia numa fábrica da dimensão da Bosch Car Multimedia Portugal, S.A.

A diversidade de ambientes nos quais foi necessário trabalhar ao longo do estágio, desde o chão de fábrica, até aos laboratórios e gabinetes de diversos departamentos, a aquisição de experiência e a aprendizagem foram uma constante.

Foram alcançados todos os objetivos propostos na realização do estágio. Após a sua concretização, a equipa passou a ter disponível uma nova ferramenta de trabalho, para a avaliação da deformação dos PCB's, para a avaliação de colisões ou interferências, bem como para a realização de outros trabalhos suportados pela modelação tridimensional. Foi também desenvolvido material de apoio para o futuro, na forma de tutoriais, que irão servir de base na ambientação ao *software* por futuros colaboradores, os quais poderão ser rapidamente capazes de realizar o mesmo tipo de testes realizados nesta dissertação.

De entre os objetivos definidos, aquele que se destacou pela elevada complexidade foi a simulação de placas de circuitos impressos por elementos finitos, utilizando o *software* NX 7.5.

Numa fase inicial o objetivo era replicar o teste realizado pela equipa de validação de processos, na aprovação do fecho dos conetores das *flex foils*. No desenrolar do trabalho, tornou-se evidente que a falta de informação relativamente à solicitação aplicada nas placas seria um problema para poder atingir resultados comparáveis à medição efetuada com extensómetros.

Contudo a existência de um teste realizado com dinamómetro, no qual a equipa procurou atingir os valores de referência para a deformação causada aos componentes críticos, permitiu que se pudessem realizar as simulações com parâmetros específicos e comparáveis aos obtidos na medição efetuada.

Tal como os resultados demonstraram, foi possível simular o teste, com um nível de rigor satisfatório, num intervalo de tempo compatível com as necessidades da equipa. A realização do teste pela equipa especializada, pode levar até vários dias, dependendo da disponibilidade da mesma. Com a capacidade de efetuar a simulação, em menos de meio-dia, somando ao tempo de cálculo especificado nos resultados, o tempo necessário para preparar a simulação, é evidente o ganho em termos de tempo para avaliação da placa, numa situação em que seja necessário testar algum tipo de solução, antes de validar o processo. É também relevante, que ao evitar o teste de uma solução que não garanta a aprovação, pode ser evitado o gasto de materiais.

Ainda no âmbito da simulação de placas e comparação com os testes em peças físicas, e após a chegada à conclusão de que não existe uma solicitação especificada para o teste de aprovação das peças e processos, foi decidido formalizar uma proposta de melhoria à fábrica com o objetivo tentar solucionar essa questão.

Após uma primeira análise, ficou claro que a maior dificuldade prende-se com a natural aleatoriedade da força exercida pelos operadores nas operações de montagem.

No entanto a aleatoriedade patente no processo de validação, vem também introduzir no teste uma nova variável nos resultados, uma vez que, as mesmas peças incorrem no risco de ser aprovadas ou reprovadas nas mesmas condições.

Desta forma, a empresa pode incorrer em riscos de aprovar peças que podem ser problemáticas, o que mais tarde se pode traduzir em reclamações do cliente, e consequentemente custos, ou, reprovar peças bem dimensionadas que poderiam garantir o cumprimento das normas, ditando a sua alteração e consequentes custos.

Para fundamentar a proposta de melhoria foram avaliados estudos demográficos, foi consultado o departamento de ergonomia, e foi executada uma avaliação da força necessária para efetuar o fecho dos conectores.

Contudo, a determinação de um valor referência que não coloque em risco a empresa, não é uma tarefa simples, e seria merecedora de um estudo mais aprofundado. Após a avaliação dos resultados obtidos nos estudos efetuados, foi ponderado o valor de 60 N, que deverá ser superior ao que algum operador poderá exercer na placa. Porém dada a fragilidade do fundamento deste valor, foi também sugerido proporcionar formação aos operadores, com o objetivo de sensibilizar os mesmos para o problema, proporcionando mais segurança ao valor proposto.

Foi também cumprido o objetivo de utilizar a ferramenta para efetuar o estudo de interferências, o qual, teve também um impacto positivo na equipa, tornando mais célere, fácil e sobretudo eficaz, a análise de possíveis colisões entre os componentes da placa e as peças, bem como entre as peças que constituem os produtos.

Ao longo do estágio, houve também oportunidade de realizar outras tarefas no âmbito da equipa, desenvolvendo ferramentas de apoio à produção de amostras, ferramentas de teste e realizando testes de validação de peças mecânicas. Foram também relevantes as participações em reuniões, formações e *workshops*, que permitiram a aquisição de conhecimento em áreas como, materiais metálicos e não metálicos, desenvolvimento de produto, gestão industrial, gestão de qualidade e planeamento.

No âmbito do tema desenvolvido, existe ainda margem para melhoria e evolução. A proposta de melhoria é um dos pontos principais a ser trabalhado no futuro. Atualmente a proposta ainda não foi formalmente apresentada aos responsáveis do processo na fábrica, os quais terão certamente uma opinião sobre o tema.

Independentemente da opinião dada pelos responsáveis, esta proposta carece de um estudo mais aprofundado. A matéria existente à data de escrita desta dissertação, permite ter uma base para entender de que forma se deve abordar o problema, ficando claro que os testes realizados mostram que existe de facto uma grande discrepância entre a força necessária para fechar um conector, e a força máxima que pode ser exercida pelos operadores, é contudo necessário precaver a flutuação existente na força aplicada.

Apesar da dificuldade em fundamentar um valor a aplicar no teste, este procedimento é fulcral para que o teste possa ser considerado fidedigno, uma vez que atualmente o mesmo é baseado na força aplicada pelo responsável pelo teste.

No que respeita as simulações, existe também espaço para evoluir.

A introdução na simulação dos componentes como os conectores de grande dimensão, que devido à sua geometria, nomeadamente com elevados momentos de inércia resistentes à deformação em determinadas direções, provocam perturbações na deformação da placa, poderá levar à obtenção de resultados mais consistentes ao longo da placa.

Para além das simulações de PCB *strain* que foram realizadas, seria interessante no futuro, explorar as capacidades do *software* NX 7.5, para simular outros tipos de problema, como por exemplo, estudar os efeitos do aparafusamento nas peças mecânicas, seria potencialmente interessante na área da equipa.

Será sempre necessário ter em consideração que a simulação serve de ferramenta para a equipa, não sendo a principal atividade da equipa, pelo que, qualquer tipo de simulação a introduzir, deve considerar que para ser viável a sua utilização, a mesma deve ser simples e rápida o suficiente para ser usada de forma frutífera, caso contrário, se as simulações não forem exequíveis num espaço de tempo razoável para a equipa, a sua utilização passa a ser desvantajosa.

Em suma, foram atingidos com sucesso os objetivos traçados e foram criados novos objetivos. Desta forma, este estágio foi uma mais-valia para a equipa, para a empresa e sobretudo uma mais-valia pessoal, pela experiência e conhecimento adquiridos.

Referências

- Abdi, S., E. Abdi, A. Oraee, and R. McMahon. 2015. "Optimization of Magnetic Circuit for Brushless Doubly Fed Machines." *Energy Conversion, IEEE Transactions on PP* (99):1-10. doi: 10.1109/TEC.2015.2468063.
- Astin, Angela DiDomenico. 1999. "Finger force capability: measurement and prediction using anthropometric and myoelectric measures." Master, Industrial and Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Ayhan, Deniz, and Benjamin W. Schafer. 2015. "Cold-formed steel member bending stiffness prediction." *Journal of Constructional Steel Research* 115:148-159. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.004>.
- Chandrupatla, T.R., and A.D. Belegundu. 1997. *Introduction to Finite Elements in Engineering*: Prentice Hall.
- Egan, B., M. A. McCarthy, R. M. Frizzell, and C. T. McCarthy. 2015. "Finite element analysis of catastrophic failure of dynamically-loaded countersunk composite fuselage joints." *Composite Structures* 133:1198-1208. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.004>.
- Exizidis, Lazaros, François Vallée, Zacharie De Grève, Jacques Lobry, and Vasilis Chatziathanasiou. 2015. "Thermal behavior of power cables in offshore wind sites considering wind speed uncertainty." *Applied Thermal Engineering* 91:471-478. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.037>.
- Gaspar, Hélia Maria da Silva. 2010. "Estudo da biomecânica da mão por aplicação do método dos elementos finitos." Mestrado Tese, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Kolan, Ming C. Leu; Akul Joshi; Krishna C. R. *Nx7 for engineering design*: Department of Mechanical and Aerospace Engineering Missouri University of Science and Technology.
- Li, L., S. M. Kim, S. H. Song, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, M. K. Chong, J. W. Park, and B. S. Kang. 2008. "Finite element modeling and simulation for bending analysis of multi-layer printed circuit boards using woven fiber composite." *Journal of Materials Processing Technology* 201 (1-3):746-750. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.190>.
- Liu, G.R., and S.S. Quek. 2013. *The Finite Element Method: A Practical Course*: Elsevier Science.
- Liyanapathirana, D. S., and S. D. Ekanayake. 2016. "Application of EPS geofoam in attenuating ground vibrations during vibratory pile driving." *Geotextiles and Geomembranes* 44 (1):59-69. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotextmem.2015.06.007>.
- Logan, D.L. 2002. *A First Course in the Finite Element Method*: Brooks/Cole.
- O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. 1994. *The finite element method*. Vol. 1: McGraw-Hill Book Company.
- Stasa, Frank L. 1985. *Applied finite element analysis for engineers*: Saunders College.
- Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu. 1997. *Introduction to finite elements in engineering*. Second ed.

Recursos web

URL 1. Bosch *website*.

http://www.bosch.pt/pt/pt/our_company_10/history_10/history.html, consultado em Agosto de 2015.

URL 2. Bosch *website*.

http://www.bosch.pt/pt/pt/our_company_10/our-company-lp.html, consultado em Agosto de 2015.

URL 3. Bosch *website*.

http://www.bosch.pt/pt/pt/our_company_10/locations_11/locations-detail_15168.html, consultado em Agosto de 2015.

URL 4. P. H. Mohite. *The origins of the finite element method*.

http://home.iitk.ac.in/~mohite/History_of_FEM.pdf, consultado em abril 2015.

URL 5. H. Qi. 2006. *Finite element analisys*.

http://www.colorado.edu/MCEN/MCEN4173/chap_01.pdf, consultado em abril de 2015.

URL 6. de Weck, Il Young. 2004. *Finite element method*.

http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf, consultado em abril de 2015.

URL 7. Siemens PLM Software *website*.

http://m.plm.automation.siemens.com/en_us/Images/2661_tcm1224-4481.pdf, consultado em maio de 2015.

URL 8. Komarla, Narendra. *FEM with UG-NX*.

<http://mbi-wiki.uni-wuppertal.de/wp-content/uploads/2011/11/FEM-with-UG-NX.pdf>, consultado em maio de maio de 2015.

URL 9. *VMH International*.

<http://www.vmhinternational.com/about-vmh/history>, consultado em junho de 2015.

URL 10. Openchannelfoundation.

<http://www.openchannelfoundation.org/projects/NASTRAN/>, consultado em junho de 2015.

Anexo: Outras atividades desenvolvidas

Ao longo dos seis meses de estágio, diversas foram as atividades desenvolvidas para além da concretização do projeto sob o qual assenta esta dissertação. Fruto da integração total na equipa, surgiram as oportunidades de executar tarefas ligadas a outros projetos em curso na fábrica.

Neste capítulo estão apresentadas e resumidas as tarefas de maior relevância, executadas durante o estágio.

JIG Audi

A necessidade de produzir uma grande quantidade de amostras para testes de software a partir de peças de outro modelo, ditou a necessidade de construir uma meio de apoio à montagem das mesmas.

O conceito adoptado pelo desenvolvimento mecânico, requeria a utilização de ligações aparafusadas para o suporte estrutural do *cluster*. No entanto, tendo em conta as restrições em termos de espaço disponível, quer no *PCB*, quer na unidade em si, foram adotados parafusos e porcas de pequenas dimensões, gerando uma dificuldade acrescida na montagem.

Posto isto, optou-se por construir um *JIG* (Figura A.1), para posicionar a estrutura de suporte da unidade, na qual previamente fossem colocadas as porcas, garantidamente alinhadas com a furação da estrutura e do *PCB*.

Esta atividade foi acompanhada ao longo de todo o processo de obtenção do *JIG*, a começar pelo design do mesmo, acompanhando o processo de cotação das empresas externas para a realização do dispositivo e terminando na avaliação do mesmo aquando da sua entrega.



Figura A.1 – *JIG* para montagem de PCB no *supporting plate*.

JIG para testes de tração de adesivos (BMW)

Com o objetivo de perceber qual a força necessária para fazer descolar um vidro da sua respetiva estrutura de suporte no produto, foi desenvolvida a tarefa de desenhar um *JIG* que permiti-se fazer o referido estudo (Figura A.2).

Tendo em conta a pequena dimensão de folga entre os limites do vidro e os limites da peça à qual este está colado, foi necessário precaver o alinhamento das peças no *JIG*, de forma a impossibilitar que aquando dos ensaios, o vidro estivesse a ser suportado por uma qualquer zona do *JIG*.

Para executar o alinhamento, foram utilizados pinos que quando alinhados com os furos existentes no vidro, garantem que, este quando pressionado apenas poderá ter movimento vertical, e que durante o posicionamento os movimentos no plano horizontal, são inferiores à folga existente, garantindo que este nunca poderá colidir com o *Jig*.

A produção deste dispositivo foi também acompanhada ao longo do seu fabrico na serralharia interna.

Posteriormente o *JIG* foi utilizado numa empresa externa onde foram realizados os ensaios.

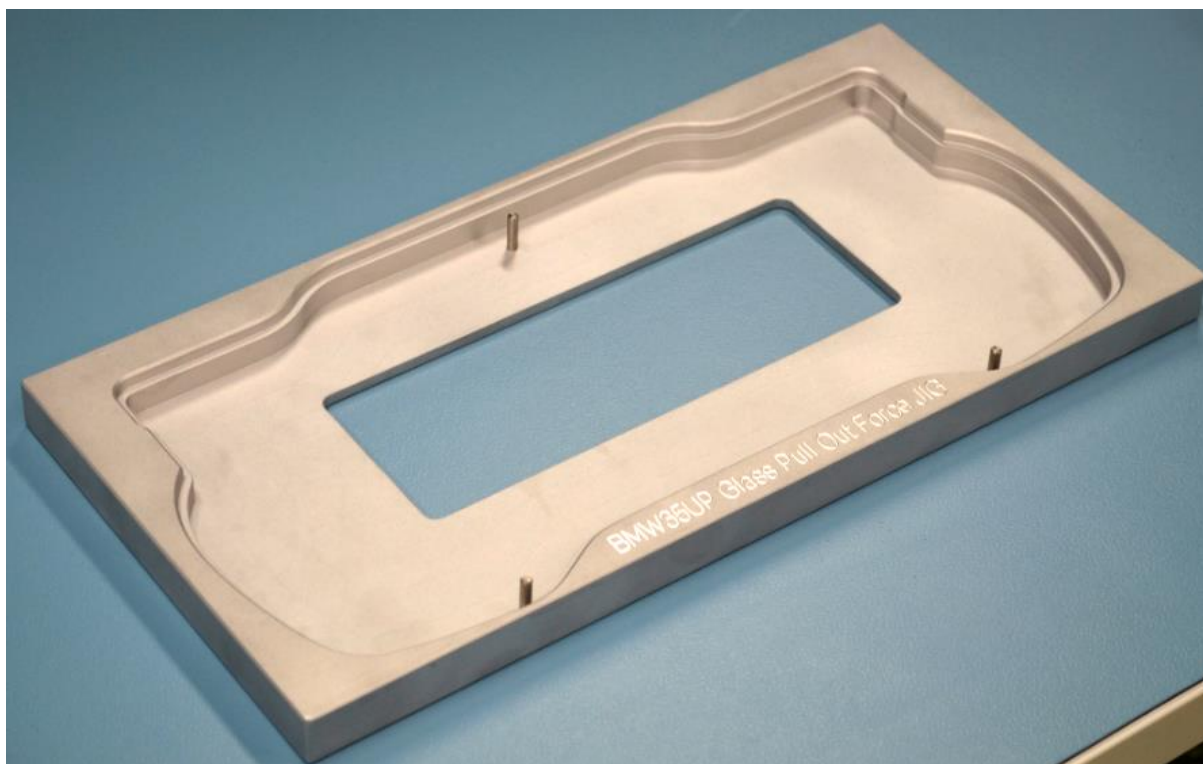


Figura A.2 – *JIG* para teste de *pull out force*.

Participação em *workshops* DFMA

Os *workshops* de DFMA (*Design For Manufacture and Assembly*), são parte vital do processo de industrialização do produto. É, no fundo, um debate no qual a equipa de desenvolvimento, tipicamente dos departamentos de desenvolvimento na Alemanha ou Hungria, apresenta o produto às equipas da fábrica de Braga.

Este *workshop* tem como objectivo, trabalhar o design do produto de forma a que a sua industrialização seja mais eficiente, focando a redução de custos de produção, a simplificação da montagem para que esta seja mais fácil e rápida, reduzir o desperdício, aumentar a qualidade e reduzir o espaço de tempo entre o desenvolvimento e a produção em massa.

Do lado dos participantes da fábrica, encontram-se representantes de várias equipas, desde a logística até ao gestores de projeto. Da equipa de avaliação mecânica de amostras desloca-se também o elemento ao qual o projeto em análise esteja alocado.

As participações nos *workshops* foram de grande importância no processo de aprendizagem e integração com os elementos, equipas e processos da fábrica, visto que, proporcionaram uma visão muito mais alargada do processo de fabrico dos produtos.

Testes de pull-out-force (PSA)

O conceito utilizado no desenvolvimento deste produto pressupõe a fixação de 2 componentes por apertos, os quais correm o risco de ser removidos durante o manuseamento das peças.

O desenho técnico da peça em questão especifica que a peça deve suportar em cada um dos elementos uma força de tração de 50 N.

O teste consistiu em utilizar um dinamómetro para solicitar os elementos à tração, até a rutura da ligação, como demonstrado na Figura A.3 e na Figura A.4.

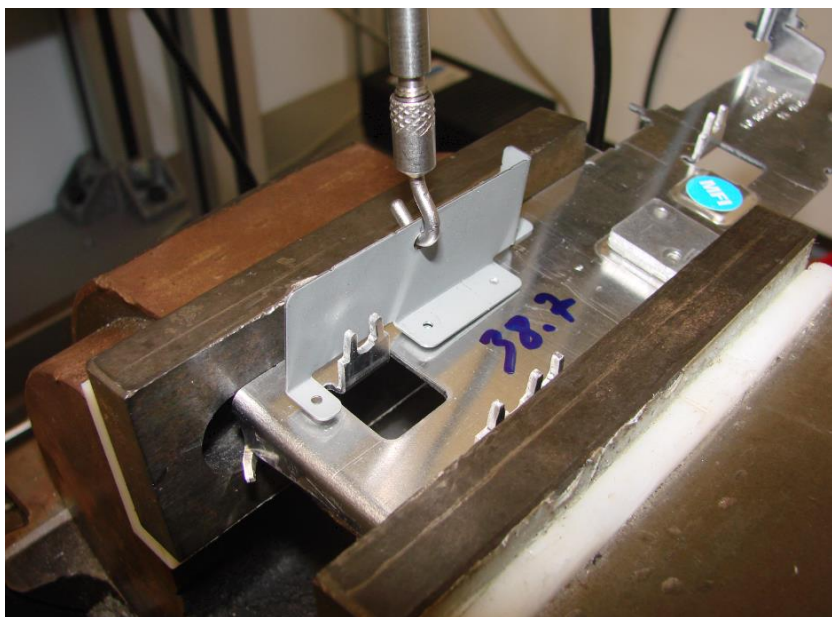


Figura A.3 – Teste de *pull out force*: plate.



Figura A.4 – Teste de *pull out force*: heat sink.